

**Untersuchungen zur tragkonstruktiven Eignung
transluzenter Sandwichstrukturen mit polymerer Kernschicht**

Vom Fachbereich Architektur, Bauingenieurwesen, Raum- und Umweltplanung
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Florian Mähl

aus Frankfurt am Main

Dekanin des Fachbereichs: Prof. Dr. Gabi Troeger-Weiss

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr. Matthias Schirren

Erster Berichterstatter: Prof. Dr. Harald Kloft

Zweiter Berichterstatter: Prof. Bernd Meyerspeer

Disputation: 13.11.2008

D 386

Kaiserslautern 2008

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Tragwerksentwurf und Konstruktionen (Fachbereich Architektur, Bauningenieurwesen, Raum- und Umweltplanung) der Technischen Universität Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Harald Kloft, an dessen Fachgebiet ich in Lehre und Forschung tätig sein konnte und der durch seine vielfältigen Anregungen und stetige Unterstützung das Zustandekommen meiner Dissertation ermöglicht hat.

Herrn Prof. Bernd Meyerspeer danke ich für sein entgegengebrachtes Interesse und für die Übernahme des Korreferates.

Herrn Junior-Professor Dr.-Ing. Paul Geiß, Arbeitsgruppe Werkstoff- und Oberflächentechnik an der TU Kaiserslautern, danke ich für seine fachliche und logistische Unterstützung im Bereich „Klebertechnologien von Glas und polymeren Werkstoffen“ sowie Herrn Wirtsch.-Ing. Pascal Kötter bei der Betreuung im Labor der Arbeitsgruppe.

Für die kostenlose Bereitstellung von Materialien und Werkstoffen zur Durchführung der praktischen Untersuchungen möchte ich den Firmen Design Composite, Mittersil; Wellmann Technologies, Friedelsheim; Huntsman Inc., Berkeley und König Kunststoffe, Weierstadt herzlich danken.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Andreas Stengelé, der mich als technischer Betreuer des fachgebietseigenen Labors während der praktischen Untersuchungen intensiv unterstützt und mit großem Einsatz zur erfolgreichen Durchführung der Versuchsreihen beigetragen hat.

Meinen Kollegen Sven Kling, Jürgen Scholte-Wassink und Martin Schroth danke ich für die gute Zusammenarbeit und die interessanten Diskussionen und Anregungen im Verlauf der Erstellung der Arbeit. Von den Studenten, die das Zustandekommen meiner Dissertation im Rahmen von Projektrecherchen (Kapitel 2.3) und der Bildbearbeitung unterstützt haben, möchte ich mich bei Sonia Monclus, Yvonne Reuter, Annika Stötzl, Rafael da Silva, Simone Walter, Marianna Dörfler und Christopher Diehl bedanken.

Für die interessanten Anregungen und Diskussionen möchte ich mich herzlich bei folgenden Personen bedanken: Herr Dipl.-Ing. Baumeister (IFAM Bremen), Herr Hupe (Airbus Industries, Hamburg), Herr Bleyemehl (material.connexion, Köln), Nicola Statmann (Frankfurt am Main), Dr.-Ing. Sigurdur Gunnarson (Reykjavik), Dr.-Ing. Viktor Wilhelm (Stuttgart), Prof. Dipl.-Ing. Klaus Fäth (FH Frankfurt), Dr.-Ing. Hans-Wilhelm Heyden (RWTH Aachen).

Meiner Frau Julia danke ich herzlich für Ihre ständige Diskussionsbereitschaft, ihre unermüdliche Motivation zu jeder Zeit und das Korrekturlesen.

Meinen Eltern gilt besonderer Dank für Ihre immerwährende Unterstützung.

Einleitung

1 Sandwichstrukturen - opak/transluzent

1.1	Grundlagen der Sandwichbauweise	12
1.1.1	Der Leichtbauaspekt von Sandwichstrukturen	12
1.1.2	Prinzip der Schichtenfolge	13
1.1.3	Statische Grundlagen	16
1.1.4	Struktur und Funktion der einzelnen Schichten und Ebenen	18
1.2	Opake Sandwichstrukturen	21
1.2.1	Allgemeines	21
1.2.2	Sandwichstrukturen im Fahrzeug- und Maschinenbau	21
1.2.3	Opake Sandwichstrukturen im Hochbau	22
1.2.4	Anfänge der Sandwichbauweise in der Architektur	23
1.3	Transluzente Sandwichstrukturen	24
1.3.1	Allgemeines	24
1.3.2	Grundlegende Merkmale	24
1.3.3	Charakteristika des Strukturgefüges	25
1.3.4	Gestaltungsaspekte	26
1.3.5	Einsatzbereiche in Architektur und Design	27

2 Typologie transluzenter Sandwichstrukturen

2.1	Kriterien der typologischen Einordnung	29
2.1.1	Produktrecherche	29
2.1.2	Prozeß-Eigenschaftsbeziehungen	29
2.1.3	Polymere Werkstoffe	31
2.2	Typologie	33
2.2.1	Typologischer Vergleich ausgewählter Produkte	34
2.2.2	Stegplatten	36
2.2.3	Wabenplatten	44
2.3	Bisherige Verwendung in der Architektur	54
2.3.1	Projektrecherche	54
2.3.2	Projekt „Fensterfabrik Hagendorn, Schweiz“	56
2.3.3	Projekt „Turnhalle in Zürich-Buchwiesen, Schweiz“	58
2.3.4	Projekt „Distributionszentrum in Bobingen“	60
2.3.5	Projekt „Logistikzentrum Ikarus, Gelnhausen“	62
2.3.6	Projekt „Zwei Wohngebäude“	63

2.3.7	Projekt „Sports and Culture Centre Holmbladsgade, Kopenhagen“	65
2.3.8	Vergleich des konstruktiven Aufwandes	66
2.3.9	Erste Einschätzungen zur bau- und tragkonstruktiven Eignung	67
3	Untersuchungen zum Tragverhalten transluzenter Sandwichstrukturen	
3.1	Gegenstand und Ziel der Untersuchungen	69
3.1.1	Inhaltliche Schwerpunkte	69
3.1.2	Versuchsmethodik	70
3.2	Statisch-konstruktive Bewertungskriterien	71
3.2.1	Beanspruchung auf Biegung	72
3.2.2	Beanspruchung auf Druck	75
3.2.3	Beanspruchung auf Abscheren	77
3.3	Versuchsbeschreibung und Auswertung	78
3.3.1	Beschreibung der Versuchsdurchführung	78
3.3.2	Versuchsreihen Biegung	80
3.3.3	Versuchsreihen - Zentrischer Druck	91
3.3.4	Versuchsreihen Abscheren	101
3.4	Bewertung der Versuchsergebnisse	106
3.4.1	Vergleichende Beurteilung des Tragverhaltens	106
3.4.2	Zusammenfassende Bewertung	107
4	Ansätze zur statisch-konstruktiven Optimierung der 3D-Wabenplatte	
4.1	Ziele und Vorgehensweise der Optimierung	109
4.2	Morphologische Strukturanalyse der 3D-Wabenplatte	109
4.2.1	Geometrische Untersuchung der Kernschicht	110
4.2.2	Statisch-konstruktive Untersuchung der Kernschicht	116
4.2.3	Ergebnisse	122
4.3	Variation in der Kernschichtlage	123
4.3.1	Variation der Wabengröße	123
4.3.2	Variation der Wabenanordnung	125
4.3.3	Kombinierte Variation von Wabengröße und Wabenanordnung	126
4.3.4	Ergebnis der Kernvariation	127
4.4	Variation in der Deckschichtlage	128

4.4.1	Zielsetzungen	128
4.4.2	Alternative Deckschichtmaterialien	129
4.4.3	Untersuchungen zum Tragverhalten - Biegung	140
4.4.4	Untersuchungen zum Tragverhalten - Druck	145
4.4.5	Untersuchungen zum Tragverhalten - Abscheren	148
4.4.6	Bewertung der Versuchsergebnisse	150
4.5	Zusammenfassung	153
5	Die 3D-Wabenplatte als Konstruktionselement	
5.1	Erweiterte Anwendungsspektren	154
5.1.1	Innenausbau	154
5.1.2	Gebäudehülle	156
5.1.3	Tragelemente	157
5.1.4	Tragwerke	160
5.2	Strategien des Fügens	163
5.2.1	Rahmenbedingungen und Anforderungen	163
5.2.2	Additive Fügetechniken	165
5.2.3	Integrierte Fügetechniken	167
5.2.4	Projektstudie	171
5.3	Ergebnisse	174
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	
6.1	Schlussfolgerungen	176
6.2	Ausblick	177
7	Literatur- und Bildverzeichnis	
7.1	Literaturnachweis	178
7.2	Produktangaben	181
7.3	Bildnachweis	182
8	Anhang	

als gesonderter Band mit Meßdaten zu den Kapiteln 3, 4 und 5

Einleitung

Diese Abhandlung dokumentiert wesentliche Forschungsergebnisse der Untersuchung von transluzenten Sandwichstrukturen in ihrer Eignung und Verwendbarkeit als tragende Konstruktionselemente in baulichen Strukturen.

Konventionelle Sandwich-Verbundmaterialien sind in der Luftfahrtindustrie und im Fahrzeugbau weit verbreitet. Vor dem Hintergrund der Bestrebungen, materialsparende und energieeffiziente Produkte für ein zunehmend komplexes Anforderungsprofil zu entwickeln, steigt seit einigen Jahren der Anteil konstruktiver Bauteile in Sandwichbauweise stetig an. Dabei spielt der Leichtbaucharakter dieser Bauweise eine entscheidende Rolle.

Sandwichstrukturen sind Werkstoffverbunde aus dünnen Deckschichten mit hoher Dehnsteifigkeit und Festigkeit, zwischen denen eine leichte und um ein vielfaches dickere Kernschicht angeordnet ist.

So erhält man sehr effiziente Werkstoffverbunde bei vergleichsweise geringem Gesamtgewicht, die für eine Vielzahl von konstruktiven Anwendungen verwendet werden können. Sandwichstrukturen sind aufgrund ihres geschichteten flächigen Aufbaus in der Regel als Platten oder Paneele erhältlich. Sie lassen sich als biegebeanspruchte Platten, Wandscheiben oder auch als räumlich gekrümmte Flächen verwenden und kombinieren.

Sandwichelemente werden seit Jahrzehnten auch im Hochbau eingesetzt. Hier finden sie meist als Fertigteile Verwendung, zum Beispiel als Fassadenelemente oder flexible Trennwände im Innenbereich. Sie sind meist aus dünnen Aluminiumdeckschichten mit Hartschaumkern aufgebaut. Diese Bauelemente sind opak und lichtundurchlässig und kommen vor allem im Industriebau zum Einsatz.

Seit einigen Jahren werden auch mehrschichtige Plattenwerkstoffe auf dem Markt angeboten, die aus lichtdurchlässigen Kunststoffen wie Acrylglas, Polycarbonat oder glasfaserverstärkten Kunststoffen bestehen. Sie werden in unterschiedlichsten Formen, Farben, Strukturen und Abmessungen hergestellt. Die Bandbreite der Produktpalette orientiert sich dabei vor allem an den Herstellungsmöglichkeiten und marktgängigen Fertigungstechniken der Kunststoffindustrie. Hieraus resultiert ein sehr breiter Grad der Ausformung des jeweiligen Plattenprofils.

Gerade der Leichtbauaspekt wird von den Produktherstellern in den Produktbroschüren gerne besonders betont: Leicht, aber gleichzeitig stabil und robust sei das jeweilige Produkt, aufgrund seines morphologischen Aufbaus. In den meisten Fällen sind diese Attribute quantitativ jedoch nicht oder nur unzureichend belegt und man erhält schnell den Eindruck, diese Information diene lediglich der Unterstreichung der jeweiligen Marketingstrategie, ein „effizientes“ und damit modernes Produkt auf den Markt gebracht zu haben. Betrachtet man den überwiegenden Teil der praktischen Anwendungen dieser Plattenmaterialien, so wird deutlich, dass ein großer Anteil der Verwendung den Sandwicheffekt, soweit er denn vorhanden sein sollte, gar nicht oder nur eingeschränkt nutzt. In diesem Zusammenhang steht natürlich vorrangig die Frage, welche dieser Produkte den Strukturprinzipien eines Sandwichverbundes wirklich entsprechen und die statisch-konstruktiven Vorzüge des Sandwichverbundes effektiv nutzen können. Überwiegend finden die Produkte dieses Marktsegments bisher Verwendung im Messebau- und Eventbereich,

im Ladenbau sowie der Innenraumgestaltung. Sie dienen dabei bisher vor allem der gestalterischen Akzentuierung von Oberflächen, hinterleuchteten Flächen oder fungieren als transluzente Raumabtrennungen.

Einige Produkte werden seit Jahren mehr und mehr im Fasadensbereich als modular eingesetzte Plattenelemente verwendet. Anwendungsschwerpunkt sind Freizeit- und Industriebauten. Die statisch-konstruktiven Potentiale, die der mehrschichtige Aufbau der Produkte teilweise mit sich bringt, bleiben aber weitgehend ungenutzt bzw. werden unzureichend berücksichtigt. Die konstruktive Verwendung und Fügung unterscheidet sich bisher nicht wesentlich von der monolithischen Plattenmaterialien.

Die Idee einer mehrschichtigen, lichtdurchscheinend „diaphanen“ Wand ist architekturgeschichtlich nicht neu. Im Gegensatz zu konventionellen Sandwichstrukturen spielt bei transluzenten Sandwichen der Kern eine zentrale, gestaltbestimmende Rolle, da dieser im Schichtverbund mehr oder weniger sichtbar ist. Auf den ersten Blick ist dies nur ein Gestaltungsaspekt. Aber die Wechselbeziehung zwischen Struktur, Gestalt und Funktion, steuerbar durch die Kombination geeigneter Materialien und dem Einsatz moderner Fertigungstechniken offenbart das konstruktive Potential hocheffizienter, lichtdurchlässiger Sandwichverbunde mit einem erweiterten Spektrum an individuellen Eigenschaften für verschiedenste architektonische Anwendungen, die bei weitem noch nicht ausgeschöpft sind.

Kapitel 1 beschreibt einführend die grundlegenden Prinzipien der Sandwichbauweise und dient zur Definition von Begriffen und Bezeichnungen. Bezugnehmend zu opaken Sandwichstrukturen werden wesentliche Merkmale und grundlegende Eigenschaften transluzenter Sandwichstrukturen aufgezeigt.

Basierend auf einer umfangreichen Produktanalyse sowie ausgewählten Anwendungsbeispielen wird in Kapitel 2 eine strukturbasierende Typologie transluzenter Sandwichstrukturen aufgestellt. Dabei werden unterschiedliche bauliche Eigenschaften überprüft und tabellarisch gegenübergestellt. Ein spezieller Fokus liegt dabei auf der Untersuchung, in welcher Weise das jeweilige Herstellungsverfahren Einfluss auf das jeweilige Eigenschaftsprofil der Plattenprodukte besitzt. In ausgewählten Projektbeispielen werden Stärken und Schwächen des bisherigen Einsatzes mit Schwerpunkt in bau- und tragkonstruktiver Hinsicht aufgezeigt und bewertet.

In Kapitel 3 erfolgt die Untersuchung der in Kapitel 2 vorgestellten transluzenten Sandwichstrukturen in Form von Versuchsreihen hinsichtlich ihrer statisch-konstruktiven Fähigkeiten. Gegenstand der Untersuchung ist die Durchführung von Biegezug-, Druck- und Abscherversuchen an definierten Prüfkörpern, um die Eignung als tragendes Konstruktionselement im erweiterten Rahmen zu testen. Gleichzeitig wird versucht, in einer vergleichenden Betrachtung zu klären, in welchem Grade die Platten in ihrer Tragwirkung konstruktionsmorphologisch der Sandwichtheorie entsprechen. Der Hauptaugenmerk liegt dabei in der Beobachtung des Verformungsverhaltens von Kern- und Deckschichtlagen und deren wechselseitige Einflußnahme in statischer Hinsicht. Die resultierenden Ergebnisse bilden die Grundlage zur Beurteilung der konstruktiven Eignung der untersuchten Sandwichverbunde für tragwerksrelevante Anwendungen.

Basierend auf den Versuchsergebnissen aus Kapitel 3 wird in Kapitel 4 der Plattentyp mit dem größten statisch-konstruktiven Potential einer weiterführenden Optimierung unterzogen. Hierbei werden zwei Ansätze verfolgt: zum einen die Optimierung der Deckschichtlage in ihrer Materialbeschaffenheit und Verbundwirkung, zum anderen die Optimierung der Kernschichtlage in Bezug auf die geometrische Struktur. Analog zu Kapitel 3 durchgeführte statische Untersuchungen bilden die Grundlage zur abschließenden Bewertung der vollzogenen Optimierungsansätze.

In Kapitel 5 wird neben der tragkonstruktiven Eignung des in Kapitel 4 optimierten transluzenten Sandwichverbundes die baupraktische Verwendbarkeit und Einsatzfähigkeit untersucht. Hierzu werden erweiterte Anwendungsspektren in der Architektur und dem Messebau aufgezeigt. Ziel ist dabei die Nutzung der Sandwichplatte als Konstruktionsraum für Fügetechnik. Den aufgezeigten Potentialen für selbsttragende Anwendungen wird versucht, fügetechnisch zu begegnen. Die konstruktive Fügung ist Thema praktischer Detailsstudien und Modellversuche zu material- und anwendungsgerechten Methoden des Fügens, die in diesem Kapitel exemplarisch aufgezeigt und bewertet werden.

Zusammenfassende Schlußfolgerungen bilden den Abschluss der Arbeit mit einem Ausblick auf weiterführende Anknüpfungspunkte der Forschung.

1. Sandwichstrukturen

- opak/transluzent

1.1 Grundlagen der Sandwichbauweise

Der Begriff „Sandwichbauweise“ bezeichnet die flächige Schichtung zweier aussenliegender dünner Deckschichten mit einer Zwischenschicht.¹ Der Begriff „Sandwich“ drückt die formale Analogie zu dem bekannten Nahrungsmittel aus zwei dünnen Bratscheiben aus, dessen Erfindung auf den Earl of Sandwich zurückgeht². Koschade³ hat in einer Untersuchung zu den heute in der Technik gängigen Bezeichnungen herausgefunden, dass im deutschsprachigen Bereich drei unterschiedliche Begriffe verwendet werden: „Verbundelement“, „Panneel“ oder „Sandwichelement“. Der Begriff „Verbund“ scheint zu ungenau gewählt, da dieser offen lässt, in welcher geometrischen Anordnung dieser Verbund erfolgt. Der Begriff „Panneel“ stammt aus dem lateinisch-niederländischen „paneel“ und bezeichnet das „vertieft liegende Feld einer Holzvertäfelung“ bzw. die gesamte Holzvertäfelung. Im Englischen und Französischen steht der Begriff allgemein für Verkleidung, der damit aber nur einem kleinen Teil der Funktionen gerecht wird, die Sandwichelemente erfüllen. Die vielfältigen Material- und Formkombinationen und die von der Qualität des flächigen Verbundes herrührenden konstruktiven Qualitäten lassen es zu, von Sandwichstrukturen bzw. von Sandwichkonstruktionen zu sprechen.

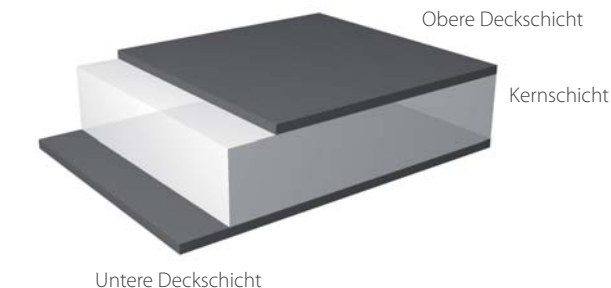


Bild 1.01: Strukturprinzip eines Sandwichgefüges:

Zwei flächige, außen liegende Deckschichten geringer Dicke werden in einem definierten Maß konstant auf Abstand gehalten. Der dabei entstehende Zwischenraum wird als Kernschicht bezeichnet und ist in der Regel durch einen leichten Werkstoff ausgefüllt.

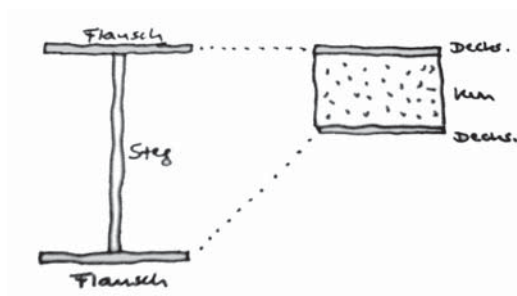


Bild 1.02: Die Analogie zu einem Doppel-T-Profil des Stahlbaus macht das Tragprinzip und die statische Beanspruchung der Einzelkomponenten einer Sandwichstruktur deutlich.

1.1.1 Der Leichtbauaspekt von Sandwichstrukturen

Sandwichkonstruktionen sind Strukturelemente des Leichtbaus. Mehrschichtige Platten in Sandwichbauweise verfügen in der Regel über ein geringes Gewicht bei gleichzeitig hoher Steifigkeit. Sie bestehen aus zwei aussenliegenden dünnen und festen Deckschichten, zwischen denen eine leichte, aber um ein vielfaches dickere Kernschicht angeordnet ist. Der Abstand der Deckschichten zueinander und die Wahl der Materialkomponenten bestimmen im wesentlichen die Geometrie- und Trageigenschaften der Platte.

- 1 Koschade zitiert Meyers Enzyklopädisches Lexikon [kos00] S.28, bei [sta74] S.8 ff. wird ebenfalls der Begriff „Sandwichbauweise“ eingeführt.
- 2 [dtv71] Band 16, S.46
- 3 Zur Definition der Sandwichbauweise, in [kos00] S.28

- System-Emergenz⁴ der Sandwichstruktur

Bei Sandwichbauteilen wird im Sinne der integrierten Bauweise das Zusammenwirken der Werkstoffkomponenten in einem Tragsystem angestrebt. Deckschicht und Kern bedingen sich gegenseitig und bilden durch ihren schubsteifen Verbund in symbiotischer Art und Weise ein konstruktiv funktionierendes Gefüge. In Bezug auf die konstruktiven Qualitäten ergibt sich durch Kombination von Deckschicht und Kern ein Mehrwert des Gefüges, der höher als die Summe der für sich stehenden Einzelkomponenten einzuschätzen ist. Im wesentlichen äußert sich diese durch eine deutliche Steigerung der Trageigenschaften. Der Sandwich-Effekt⁵ besteht darin, dass bei schub- und zugfester Verbindung der Deckschichten mit der Tragschicht ein neues Tragsystem mit völlig verändertem Tragverhalten entsteht. Das in der Regel dreischichtige Sandwichelement weist hierbei wesentlich höhere Biegesteifigkeiten auf als die Summe der Einzelsteifigkeiten von Deckschichten und Kernschicht. Man kann also in der Tat von einem emergenten⁶ System sprechen. Die effektive Verbundwirkung wird durch die Material- und Geometriewahl der Einzelkomponenten sowie durch eine adäquate Fügetechnik bestimmt.

Grundsätzlich werden vor allem in der Automobil- und Luft- und Raumfahrtindustrie die statisch-konstruktiven Vorzüge der Sandwichbauweise genutzt, es lassen sich jedoch auch bauphysikalische, gestalterische und funktionale Potentiale nutzen und auf individuelle Anforderungen einstellen.

Neben der Materialwahl hängt das Eigenschaftsspektrum des Plattenprodukts aber gerade von der Art und Weise der Herstellung ab. Die Ausbildung der Schichtfuge zwischen den Deckschichten und der Kernschicht wird im wesentlichen durch die Art und Weise des Produktions- und Veredelungsvorgangs bestimmt.

- Analogie Herstellung/Fügung

Die Herstellung von Sandwichen ist vergleichsweise einfach, diverse Techniken sind angelehnt an Methoden des industriellen Holzbaus, vor allem in der Fügetechnik. So werden die Schichten bzw. Lagen ähnlich wie bei Schichtholz flächig miteinander verklebt. Auch für die Fügung von Bauteilen untereinander lassen sich Techniken des Holz- und Möbelbaus anwenden.

1.1.2 Prinzip der Schichtenfolge

1.1.2.1 Schichten und Ebenen

Die Sandwichbauweise ist durch die flächige Anordnung von parallelen orientierten Schichten gekennzeichnet. Die einzelnen Schichten besitzen dabei üblicherweise in der Fläche die gleichen Abmessungen, sie unterscheiden sich in ihrer Dicke und in der Materialität.

4 „Emergenz“ bezeichnet Eigenschaften eines komplexen Systems, die seine Einzelteile nicht besitzen und die erst durch das Zusammenwirken der Einzelteile (Agenten) entstehen. [ric02], S.122

5 [kos00] S.29

6 vgl. 2

Eigenschaftsvariabilität von Sandwichstrukturen - Morphologie

STATISCH - KONSTRUKTIV			GEOMETRIE		QUERSCHNITT	
BELASTUNG			AUFBAU		ANZAHL DER SCHICHTEN	
		Scheibe (Fassade, Dach)	AUFBAU		3	
		Platte (Boden, Wand)			variabel	
		Variation	DIEKSCHICHT		symmetrisch	
		Richtung	KERN		asymmetrisch	
		Steifigkeit (Gewicht)	LAGERUNG		dick	
		Richtung			dünn	
		Balken	Richtung		hohl	
		Rechteckplatte	Dicke		an-isotrop	
		(Kreisplatte)	Struktur		hohl Struktur	
			Richtung		voll	
			Dicke		isotrop	
			Struktur		voll	

Bild 1.03: Eigenschaftsvariabilität von Sandwichstrukturen (nach [sta74] S.2)

Da Länge und Breite im Vergleich zur Dicke relativ groß sind, handelt es sich bei den Schichten in der Regel um plattenförmige Werkstoffe und Halbzeuge. In der klassischen Sandwichbauweise werden drei Schichten miteinander kombiniert, zwei äußere Deckschichten A, C und eine dazwischenliegende Kernschicht B (Bild 1.04).

Die Grenzflächen der einzelnen Schichten werden im folgenden als Ebenen bezeichnet. Die Ebenen 2 und 3 dienen als Kontaktflächen zur Verbindung der Schichten untereinander. Die Ebenen 1 und 4 bilden die äußeren Begrenzungsflächen der Schichtenfolge.

1.1.2.2 Schichtenfolge und Eigenschaftsvariabilität

Durch individuelle Ausformung der Schichten und Ebenen lässt sich das Eigenschaftsprofil einer Sandwichkonstruktion in einem sehr breiten Spektrum steuern. Dieses wird im wesentlichen durch vier Punkte bestimmt:

- Materialien der Deck- und Kernschicht
- Dickenproportion der Schichten zueinander
- geometrische Struktur der Kernschicht
- konstruktive Ausbildung der Schichtfugen

In Bild 1.03 zeigt eine Matrix⁷ exemplarisch den Variantenreichtum von Sandwichkonstruktionen. Die verschiedenen Konfigurationen wurden nach statisch-konstruktiven und geometrischen Gesichtspunkten gegliedert.

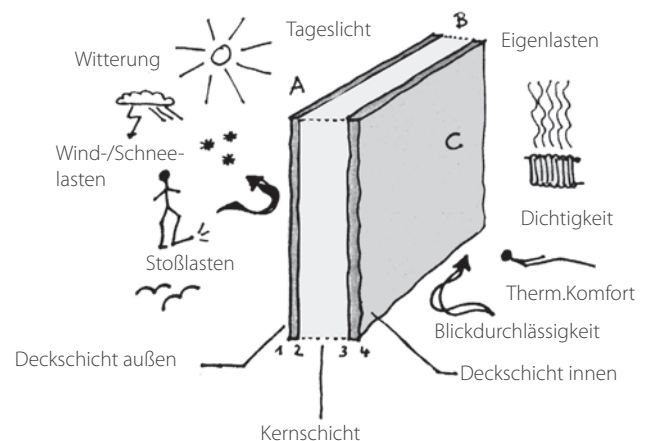


Bild 1.04: Schichten und Ebenen einer Sandwichkonstruktion und deren räumlicher Bezug zu typischen funktionalen Anforderungen im Bauwesen

Schicht A - Deckschicht außen

Schicht B - Kernschicht

Schicht C - Deckschicht innen

Ebene 1 - Oberfläche außen A

Ebene 2 - Kontaktfläche A/B: Schichtfuge

Ebene 3 - Kontaktfläche B/C: Schichtfuge

Ebene 4 - Oberfläche außen C

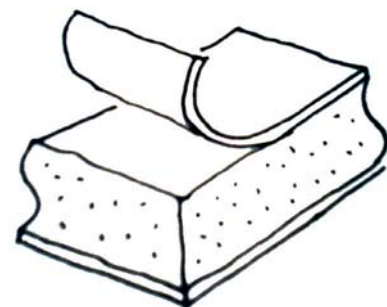


Bild 1.05: Horizontale Anordnung der Schichten und Ebenen

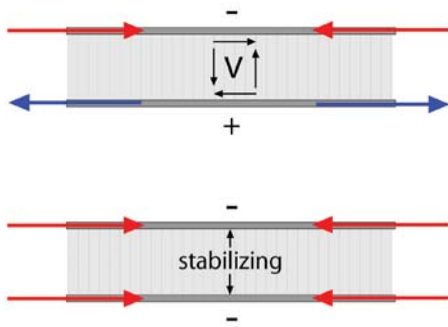


Bild 1.06: Transportwege der Schnittkräfte in einem Sandwichelement

- bei Beanspruchung durch Biegung (oben)
- bei Beanspruchung durch zentrischen Druck (unten)

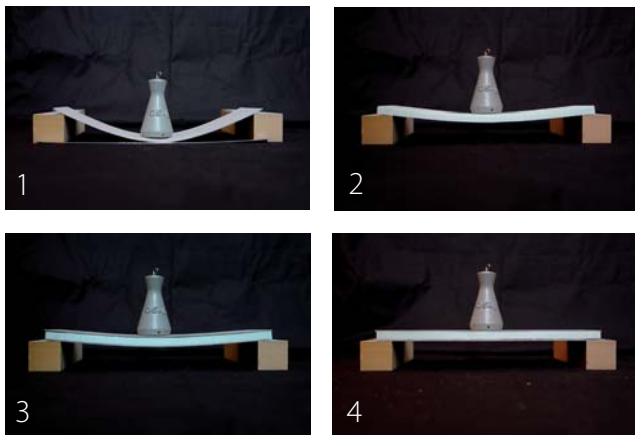


Bild 1.07: Versuch zum Sandwicheffekt

Deckschichten aus Graupappe 1mm, Kernschicht aus Polystyrol-Hartschaum 10mm, Einzellast 500 g, Spannweite 300 mm:

1. Durchbiegung Deckschicht: nicht tragfähig
2. Durchbiegung Kernschicht: hohe Durchbiegung
3. Durchbiegung Sandwich ohne Schubverbund: unverändert
4. Durchbiegung Sandwich mit Schubverbund: minimal

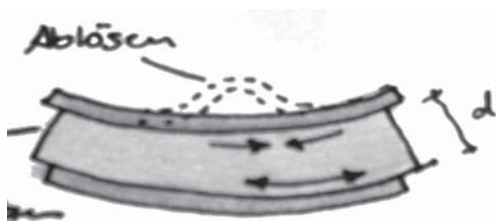


Bild 1.08: Biegung: Beanspruchte Schubfuge und Wechselwirkung in der druckbeanspruchten Deckschicht (oben)

1.1.3 Statische Grundlagen

Der Sandwicheffekt gilt als Grundprinzip der Sandwichbauweise. Dünne, hochfeste Deckschichten werden durch einen dicken, aber leichten Kern Schubsteif verbunden und auf konstanten Abstand gebracht. Je stärker der Kern, desto höher die Steifigkeit und Festigkeit des Gesamtgefüges – in der Regel bei geringer Gewichtszunahme.




Die Einzelschichten verfügen für sich über eine sehr geringe Tragfähigkeit. Besonders anschaulich wird dies bei biegebeanspruchten Sandwichstrukturen (Bild 1.07).

Bezogen auf die Spannweite haben die dünnen Deckschichten eine sehr geringe statische Höhe (1). Aus diesem Grunde sind Deckschichtmaterialien mit hoher Rohdichte, wie zum Beispiel Stahl- oder Aluminiumbleche nicht in der Lage, sich selbst zu tragen. Die leichte, meist poröse oder strukturierte Kernschicht besitzt in der Regel einen niedrigen Elastizitätsmodul und ist daher ebenfalls vergleichsweise biegeweich (2). Die lose Schichtung der Deck- und Kernlagen führt noch zu keiner wesentlichen Verbesserung der Durchbiegung (3).⁸ Erst die zug- und schubfeste Koppelung der Deckschichten mit der Kernschicht bewirkt den Sandwicheffekt (4). Dieser Effekt lässt sich auf die nun möglich gewordene Aufteilung des inneren Kräftepaars zurückführen: bei kraftschlüssiger Haftung der Schichten untereinander tragen die Deckschichten das aus dem Biegemoment resultierende Kräftepaar als in der Fläche wirkende Druck- bzw. Zugkräfte ab (Bild 1.06). Aus der hohen Dehnsteifigkeit der Deckschichten, die dem Kräftepaar entgegengesetzt wird, resultiert eine geringe Biegeverformung.

Die leichte Kernschicht hält den definierten Abstand und damit den Hebelarm des Kräftepaares konstant und bewahrt die druckbeanspruchte Deckschichtlage vor Stabilitätsversagen wie Ausbeulen oder Knittern. Je steifer die Kernschicht quer zu den Deckschichten ist, umso größer ist dessen Stabilitätsvermögen. Da die Deckschichten sehr dünn sind, wirken diese wie Membranen und verhalten sich sehr schubweich. Aus diesem Grund wird die Querkraft praktisch vollständig von der Kernschichtlage aufgenommen und in die Auflager geleitet. Es resultiert eine zusätzliche Verformung durch Schub. Materialität und Geometrie der Kernschicht werden meist so gewählt,

8

Die Reibung zwischen den geschichteten, aber nicht verbundenen Materialien wurde vernachlässigt.

Sandwichverbund	nur Deckschichten	Platte mit Kern	Platte mit Kern
			
Deckschichtdicke t			
Kerndicke	0	$2t$	$6t$
Gesamtdicke	$2t$	$4t$	$8t$
Biegesteifigkeit	1	7	37
Biegefestigkeit	1	3,5	9,2
Gewicht	1	1,03	1,06

dass dessen Schubsteifigkeit den Verformungsanteil durch Schub an der Gesamtverformung möglichst gering hält.

Bild 1.09 setzt die statischen Kennwerte eines typischen Aluminium-Hartschaum-Sandwichelements⁹ mit unterschiedlichen Schichtdicken in Relation. Die Dicken der Deckschichtlagen sind konstant, die Kernschicht variiert in ihrer Dicke. Die Werte beziehen sich auf ein Sandwich-element, das nur aus den beiden Deckschichten besteht. Das Bild zeigt bei einer Erhöhung der Gesamtdicke um den Faktor 4 eine Erhöhung der Biegesteifigkeit um das 37-fache bei einer Gewichtszunahme von lediglich 6%.

Bei druckbeanspruchten Sandwichkonstruktionen erfolgt der innere Kräfte transport ausschließlich über die Deckschichten. Die Kernschicht hat hier lediglich die Aufgabe, die außenliegenden, druckbeanspruchten Deckschichten gegen globales Beulen der Gesamtkonstruktion oder lokales Knittern zu stabilisieren (Bild 1.06/1.08).

Die durch Biege- und Druckbeanspruchung resultierenden Anforderungen an die Materialsteifigkeiten der einzelnen Schichten zur optimalen Nutzung des Sandwicheffekts sind in Bild 1.10 dargestellt.

Durch Kombination ungerichteter bzw. gerichteter Materialien lässt sich das Isotropieverhalten der Sandwichkonstruktion in der Fläche steuern. Bei der Verwendung homogener Deckschichten bestimmt die Kernschicht den Isotropiecharakter des Gesamtgefüges und damit maßgeblich die konstruktiven Eignung als (selbst-) tragende Scheibe oder Platte und die daraus resultierenden Anwendungsmöglichkeiten.

Bild 1.09: „Sandwicheffekt“: Gegenüberstellung statischer Kennwerte eines biegebeanspruchten Sandwichelements aus Aluminium-Deckschichten und Hartschaum-Kern (Referenzwerte =1)

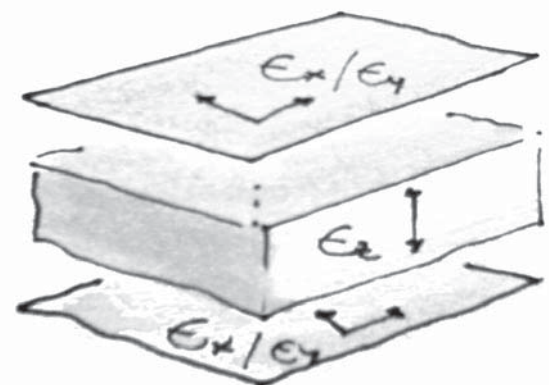
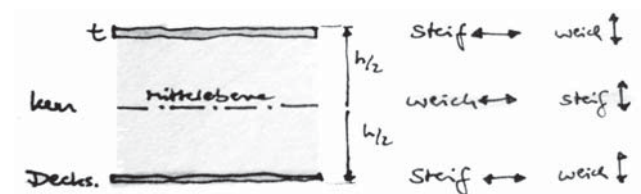


Bild 1.10: Optimale Materialsteifigkeiten in einer Sandwichkonstruktion:
Deckschichten: hoher Elastizitätsmodul in der Fläche E_x, E_y
Kernschicht: hoher Elastizitätsmodul quer zur Fläche E_z

1.1.4 Struktur und Funktion der einzelnen Schichten und Ebenen

1.1.4.1 Gesamtgefüge

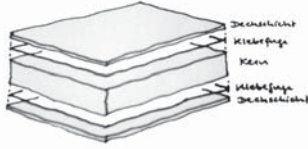


Bild 1.11: Schichten- und Ebenenfolge einer Sandwichstruktur

Der morphologische Aufbau eines Sandwichelementes bestimmt die statisch-konstruktiven Eigenschaften. Die Mehrschichtigkeit ermöglicht darüberhinaus die individuelle Ausstattung mit bauphysikalischen Funktionen wie Transport, Dämmung, Adichtung, Lenkung oder Speicherung extern einwirkender Medien wie Licht, Wärme, Gase oder Flüssigkeiten. Die Schichtung unterschiedlicher Materialitäten und Strukturformen birgt zudem gestalterisches Potential. Dieser Aspekt spielt gerade bei transluzenten Sandwichstrukturen eine besondere Rolle, wie in Kapitel 1.4 aufgezeigt wird.

1.1.4.2 Deckschicht

Die dünnen Deckschichtlagen sind die flächenbildenden Schichten und bestimmen in ihrer räumlichen Lage zueinander die Außenabmessungen eines Sandwichelementes.

Die im optimalen Fall hochfeste und dehnsteife Deckschicht schützt durch ihre materiellen Eigenschaften die weiche Kernstruktur sowie die Schichtfugen vor externen Einflüssen wie Strahlung, Temperaturextrema, Feuchtigkeit, chemischen Angriffen oder temporären mechanischen Beanspruchungen. Die Außenflächen sollten robust und widerstandsfähig sein, da über einen langen Zeitraum die Beanspruchung in diesen Ebenen durch äußere Einflüsse am höchsten ist.

Die Deckschichten bilden die visuell und haptisch wahrnehmbare Außenhülle der Sandwichkonstruktion. Die einzelnen Ebenen bieten technisches als auch gestalterisches Potential für die Oberflächenveredelung durch Beschichtung, Bedruckung und Beklebung. Die Oberflächen lassen sich zum Beispiel farblich gestalten, strukturieren oder aufräumen. Technische Beschichtungen können zudem bauphysikalische oder gebrauchstechnische Eigenschaften verbessern. So können zum Beispiel transluzente Deckschichten mit strahlungsfILTERnden oder schmutzabweisenden Coatings¹⁰ ausgestattet werden.

Öffnungen, Bohrungen oder Unterbrechungen in den Deckschichten sollten auf ein Minimum begrenzt bleiben und so beschaffen sein, dass keine Kerbspannungen oder Spaltrisse auftreten und der Kraftfluss in der Fläche nicht eingeschränkt wird.

Üblicherweise kommen Vollwerkstoffe mit homogenen und glatten Oberflächen zum Einsatz. Profilierte Deckschichten werden oft bei gerichteten Sandwichelementen verwendet, die in eine definierte Hauptrichtung tragfähig sein sollen. Geeignete Materialien für rein technische Anwendungen sind Metallbleche aus Aluminium und Stahl (glatt oder profiliert). Vermehrt kommen kohlefaserverstärkte und glasfaserverstärkte Kunststoffe zur Anwendung, da sie relativ leicht und hochbelastbar sind und aufgrund ihres Verbundcharakters ihrerseits weiteres konstruktives Optimierungspotential besitzen. Bei lichtdurchlässigen Sandwichstrukturen sind Glas, Acrylglas, Polycarbonat und GFK je nach Anforderung unterschiedlich gut geeignet, wie später in Kapitel 4 ausführlich beschrieben wird.

¹⁰ Coatings sind Beschichtungen, die beim Herstellungsvorgang auf die Platten aufgedampft oder auf laminiert werden und meist nur wenige Mikrometer dick sind. Sie können nanotechnische Effekte hervorrufen.

1.1.4.3 Kernschicht

Die Kernschicht füllt den durch die Deckschichten aufgespannten Zwischenraum aus. Sie fixiert die geometrischen Lage der Deckschichten zueinander und trägt wie bereits gezeigt zur Stabilisierung des Gesamtgefüges bei. Darüberhinaus kann die Kernschicht weitere Funktionen übernehmen, bei der sich die strukturbedingt notwendige Dicke als Vorteil erweist. So bewirkt die zellförmige Struktur der Kernschicht meist gute Wärmedämmeigenschaften und kann zur gesteuerten Transmission und Speicherung von Licht, Luft und Energie herangezogen werden. Zur Effizienzsteigerung des Gesamtgefüges werden Werkstoffe oder Halbzeuge geringer Rohdichte verwendet und der feste Volumenanteil des verwendeten Werkstoffs durch geeignete Strukturgeometrien minimiert.

Die Kernstruktur ist durch ihre kleinste Einheit „Zelle“ quantifizierbar. Eine großer Zellabstand reduziert den Materialeinsatz, erzeugt aber eine größere „Spannweite“ der Deckschichten, was sich negativ auf die Gesamtstabilität auswirken kann. Auch die Kontaktfläche der Klebefuge reduziert sich. Dies kann zu einer Erhöhung der Beul- und Knittergefahr führen, was wiederum nur durch Erhöhung der Deckschichtdicken kompensiert werden kann. Eine kleinere Zellgröße führt zu einer Vergrößerung der Klebefläche, erhöht aber gegebenenfalls den Materialeinsatz der Kernschicht. Die Zellen können räumlich für sich abgeschlossen sein, was sich beispielsweise günstig auf die Wärmedämmeigenschaften auswirkt, oder aber je nach Strukturprinzip ein „Raumkontinuum“ bilden. Auf Grundlage eigener Untersuchungen lassen sich drei strukturelle Grundformen von Kernstrukturen unterscheiden (Bild 1.12):

1. Ungerichtete homogene Kerne
 - weisen in x,y,z-Richtung ein gleichförmiges, nahezu isotropes Verhalten auf
 - poröse, schaumartige Kernstrukturen mit abgeschlossenen Zellen
 - Werkstoffe: geschäumte Kunststoffe, geschäumte Leichtmetalle (Aluminium)
2. Ungerichtete strukturierte Kerne
 - weisen in x,y-Richtung ein sehr unterschiedliches Isotropieverhalten auf
 - wabenartige Strukturen, meist abgeschlossene prismatische Zellen mit dünnen Zellwänden, Zellen mit runder, dreieckiger, viereckiger (orthotrop), oder hexagonaler Grundfläche sowie dreidimensionale Raumstrukturen mit abgeschlossenen oder zusammenhängenden Zellräumen
 - Werkstoffe: thermoplastische Kunststoffe, faserverstärkte Kunststoffe, Aluminiumblech, Spezialpapiere und -kartone
3. Gerichtete strukturierte Kerne
 - weisen ein gerichtetes, anisotropes Verhalten auf
 - stegartige Strukturen, mit offenen oder gefüllten Luftzellen bzw. -kammern, zum Beispiel Stegplatten
 - Werkstoffe: thermoplastische Kunststoffe, faserverstärkte Kunststoffe, dünne Metallbleche

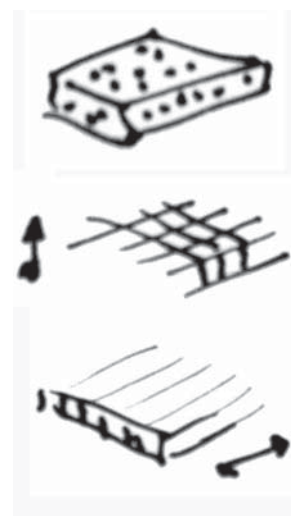


Bild 1.12: Strukturelle Grundformen für Sandwichkerne

Werden lichtdurchlässige Deckschichten mit strukturierten Kernen kombiniert, wird der Kern visuell wahrnehmbar und zur gestaltprägenden Schicht des Gesamtgefüges.

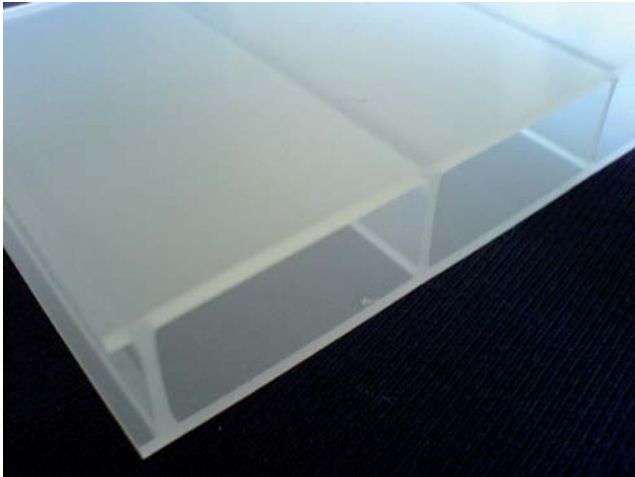


Bild 1.13: Integrierte Schichtfuge: Die Acrylglas-Stegplatte wird in einem thermischen Extrusionsprozess aus einem Grundmaterial gefertigt.



Bild 1.14: Additive Schichtfuge: Abschälproblematik an den Stirnseiten von Sandwichstrukturen, im Eigenversuch an einem 40mm dicken transluzenten Sandwichelement aus Polycarbonat mit geklebter Schichtfuge.

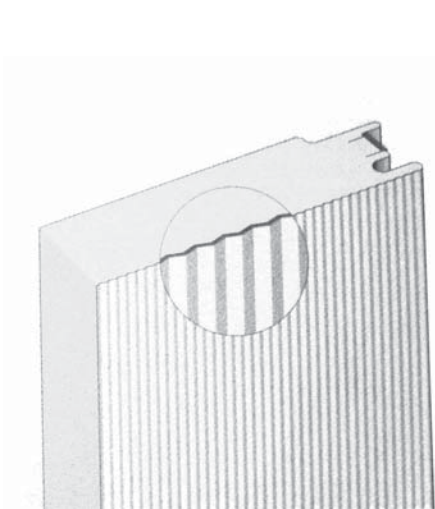


Bild 1.15: Aluminium-Hartschaum-Sandwich mit profilierter Stirnfläche: Das Nut- und Federsystem dient zur Fügung der Platten untereinander und zur externen Befestigung. System Hoesch isowand integral

1.1.4.4 Schichtfuge

Deck- und Kernschichten werden miteinander kraftschlüssig verbunden, entweder additiv durch flächiges Kleben oder Schweißen, oder integral durch Stoffschluss im Zuge eines „einstückigen“ Herstellungsprozesses. Als Beispiele hierfür gelten extrudierte Stegplatten aus Thermoplasten (Bild 1.13) oder Aluminiumsandwiche mit ausgeschäumter Kernschicht, die selbstbildend haften.

Die Schichtfuge muss das Kräftegleichgewicht zwischen den normalbeanspruchten Deckschichten und dem querkraftbeanspruchten Kern über flächengleichen Schub herstellen.

Bei additivem Verbund hängt die Leistungsfähigkeit im wesentlichen von den Festigkeitseigenschaften des gewählten Klebstoffes/Schweißgutes und der Beschaffenheit der zur Verfügung stehenden Kontaktfläche ab. Je kleiner die Kontaktfläche ist, desto größer sind die Anforderungen an die Eigenschaften des Klebstoffes/Schweißguts. Die Kontaktfläche ist besonders bei prismenartigen, dünnwandigen Wabenkernen im Vergleich zur Grenzfläche verhältnismäßig klein und damit besonders anfällig für Abschälbrüche. Stamm¹¹ weist darauf hin, dass nach Möglichkeit die Schub- und Zugfestigkeit der Verbindung die Schub- und Zugfestigkeit des Kernmaterials übertreffen sollte, damit die Tragfähigkeit des Sandwichverbundes nicht durch die Güte der Verbindung bestimmt wird.

An den stirnseitigen Bereichen sind die offenen Schichtfugen und Schnittflächen der Schichten gegen äußere Witterungseinflüsse sowie gegen abschälende Kräfte zu schützen (Bild 1.14). Da die Ränder der Platten oft auch statische Auflagerbereiche darstellen, erreicht die Schubbeanspruchung in diesen Bereichen oft ihr Maximum. Diese Umstände bestimmen ganz wesentlich die Prinzipien einer sandwichgerechten Fügetechnik. Üblicherweise werden die Stirnflächen mit einem zusätzlichen Randabschluss versehen oder systemabhängig durch Profilierung der Deckschichten geschlossen. Die Profilierung kann dabei gleichzeitig Verbindungstechnik aufnehmen (Bild 1.15).

1.2 Opake Sandwichstrukturen

1.2.1 Allgemeines

Opake Sandwichstrukturen finden seit Jahren Anwendung als tragende Bauteile in der Luft- und Fahrzeugindustrie sowie als modulare Bausysteme meist zu Verkleidungszwecken im Hochbaubereich. Die Sandwichverbunde sind lichtundurchlässig aufgrund opaker Deckschichtmaterialien wie Metallbleche oder faserverstärkte Kunststoffe. Die Sandwichkonstruktion wird aufgrund ihrer guten mechanischen und thermischen Eigenschaften als Leichtbauelement eingesetzt¹².

1.2.2 Sandwichstrukturen im Fahrzeug- und Maschinenbau

Das gute Verhältnis zwischen Steifigkeit und Gewicht wird vor allem in der Luft- und Raumfahrt- sowie in der Automobilindustrie und im Schiffbau geschätzt, da hier die Einsparung von Gewicht ein hoch zu bewertendes Wirtschaftlichkeitskriterium im Betrieb darstellt. In diesen Industriezweigen werden hauptsächlich Sandwichstrukturen mit hexagonalem Wabenkern (Honeycomb) verwendet. Es werden vornehmlich Deckschichten aus faserverstärktem Kunststoff mit Glasfaser-, Aramid- oder Kohlenstofffasereinlage mit Kernschichten aus Papierwaben („Nomex“) kombiniert. Gestaltungsaspekte spielen keine Rolle und sind für die Verwendung auch meist unbedeutend.

Bei Luftfahrzeugen der heutigen Generation dienen Honeycomb-Sandwiche als Wandsysteme sowie als Kabinenboden. Bestimmte Bauteile bzw. ganze Rumpfabschnitte der Fluggastzelle werden mittlerweile mit Honeycomb-Sandwichen gefertigt (Bild 1.17). Stark beanspruchte Bauteile wie das Leitwerk und die Ruder der Tragflächen sind bereichsweise aus Honeycomb-Sandwichen konstruiert. So werden an der durch Vogelschlag besonders beanspruchten Leitwerks-Vorderkante der Airbus-Baureihen A320 und A380 hochbelastbare Kohlefaser-Prepegs¹³ in mehreren Lagen mit „Nomex“-Wabenkern verarbeitet (Bild 1.18)¹⁴. Verkleidungen und Kabinenabtrennungen für Schiff- und Schienenfahrzeuge bestehen ebenfalls aus Sandwichelementen. In der Automobil-Industrie werden Fahrzeugkomponenten wie Spoiler, Stoßdämpfer sowie sicherheitsrelevante Verstärkungen der Karosserie mit Honeycomb-Sandwichen gefertigt. Für stark beanspruchte Bauteile des Anlagen- oder Automobilbaus werden vermehrt Aluminiumsandwiche mit Schaumkern vergewendet (Bild 1.19). Bei Foaminal¹⁵-Sandwichen werden zwei Aluminiumdeckschichten mit einer kompaktierten Aluminiumpulver-Treibmittel-Mischung verpresst. Die Kernschicht schäumt bei 700°C auf. Unterschiedliche Dicken und Bauteilgeometrien sind möglich. Einen Vorteil bildet die stoffschlüssige Ausbildung der Schichtfuge. Bei APM-Sandwichen wird der durch die Deckschichten aufgespannte Zwischenraum durch harzgetränkte Aluminiumhohlkugeln aufgefüllt. Bei 180°C härtet der Klebstoff aus. Das Verfahren ist mit verschiedenen Deckschichtmaterialien denkbar, es entsteht jedoch kein homogener Werkstoffverbund. Nach Angaben des Fraunhofer-Instituts IFAM in Bremen besteht bereits verstärktes Interesse aus dem Produktdesign.¹⁶

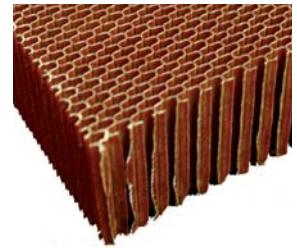


Bild 1.16: Hexagonaler Wabenkern aus harzgetränktem Spezialpapier „Nomex“

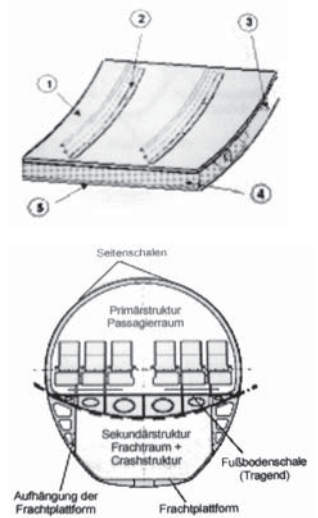


Bild 1.17: Sandwichstrukturen als tragende Schalelemente im Rumpfbau eines Flugzeugs

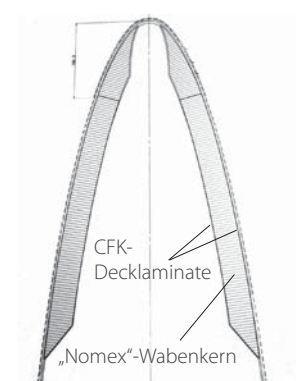


Bild 1.18: Horizontalschnitt durch die Leitwerksvorderkante eines Airbus A-320

12 [kle05] S.192

13 vorgetränktes Fasergeilde mit Gewebe, dessen Harzsystem unter Druck und Hitze aushärtet [rgf04]

14 Besuch der Endmontage Airbus A321 in Hamburg-Finkenwerder am 18.10.2005 sowie der Serienfertigung Leitwerk Airbus A380 in Stade am 24.02.2006

15 Produktbezeichnungen des IFAM

16 Besuch beim Fraunhofer-Institut für angewandte Materialforschung in Bremen am 01.12.2005

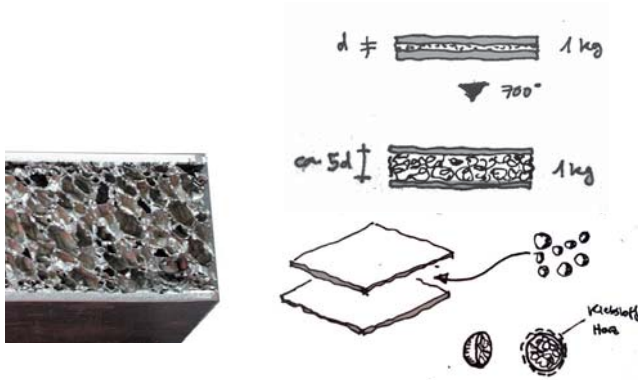


Bild 1.19: Herstellung von Aluminiumschaum-Strukturen: oben Foaminal-, unten APM-Sandwiche



Bild 1.20: Beispielhaftes Montageprinzip eines opaken Sandwich-Fassadensystems, hier mit integrierten Fenstern



Bild 1.21: Müllverbrennungsanlage ROTEB in Rotterdam, Niederlande (A: Maarten Struijs, 1994) mit Fassadenverkleidung aus 60mm Stahl-Sandwichelementen mit profilierter Fuge in der Horizontalen

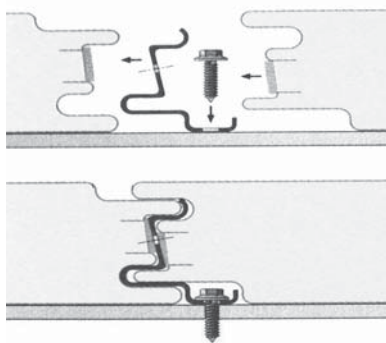


Bild 1.22: Horizontalschnitt durch ein Aluminium-Hartschaum-Sandwich mit profilierter Stirnfläche und integrierter Füge- und Klebefuge: System Hoesch isowand integral

1.2.3 Opake Sandwichstrukturen im Hochbau

Im Hochbau sind opake Sandwichstrukturen seit Jahrzehnten in Gebrauch. Vorteile durch das reduzierte Gewicht der Bauteile ergeben sich vor allem in Bezug auf den Transport- und Montageaufwand sowie auf die reduzierte statisch-konstruktive Auslegung der Unterkonstruktion. Die steifen Paneele ermöglichen meist eine mindestens geschosshohe Elementierung der Fassade. Verschiedene Hersteller haben ein auf die Bedürfnisse des Industriebaus optimiertes Baukastensystem entwickelt, um Hallen und Industrieanlagen großflächig zu verkleiden und dabei den unterschiedlichen bauphysikalischen Anforderungen mit einem universalen Bauelement gerecht zu werden (Bild 1.20). Heutzutage bietet eine große Zahl an Systemherstellern plattenförmige Sandwichpaneele für den Fassadenbereich an. Die Elemente bestehen aus dünnen Aluminiumdeckschichten als Witterungsschutz, verklebt mit porösen Hartschaumkernen aus Polyurethan zur Wärmedämmung. Die Füge- und Klebtechnik ist in den Bausystemen bereits integriert und häufig nicht sichtbar an den Stirnseiten angeordnet (Bild 1.22). Meist wird ein Nut- und Federsystem ausgebildet, in das eine Klammer eingreift, die mit der Unterkonstruktion verbunden ist. Die Dichtigkeit stellt sich entweder durch Verkeilung der Plattenprofile ein oder durch zusätzliche Fugenbänder, die im Nut- und Federsystem angeordnet sind und für Schlagregen- und Dampfdichtigkeit sorgen.

Es handelt sich um vergleichsweise wirtschaftliche Systeme, die auf Vorrat hergestellt und in großen Flächen verbaut werden können. Ein Gestaltungspotential ist nur eingeschränkt vorhanden, zum Beispiel im Bereich der Stoßfugen oder durch Verwendung profilierter Deckschichten (Trapezbleche). Die Fassadenoberfläche lässt sich bedingt strukturieren, die Tragfähigkeit etwas verbessern. Die Elementdicken sind je nach Anbieter und System unterschiedlich, sie differieren zwischen 40 und 200 mm. Die Integration von Flächen zur Belichtung und Belüftung ist möglich, baukonstruktiv jedoch vergleichsweise aufwendig. Die großen, meist unstrukturierten Fassadenflächen führen nicht selten zu einem recht monotonen Erscheinungsbild (Bild 1.21).

In Büro- und Verwaltungsgebäuden werden leichte Trennwände in Sandwichbauweise verwendet, um den Nutzern eine flexible Raumauteilung zu ermöglichen. Der Schaumstoffkern dient hier vor allem brandschutz- und schallschutztechnischen Erfordernissen.

1.2.4 Anfänge der Sandwichbauweise in der Architektur

Der Konstrukteur Jean Prouvé interessierte sich für industrielle Produktionsformen, besonders für die neuen Konstruktionstechniken des noch jungen Flugzeug- und Automobilbaus der 1920er- und 1930er Jahre.¹⁷ Für das Gebäude La Maison du Peuple in Clichy¹⁸ entwickelt er bereits 1937 ein modulares, vorgefertigtes Fassadensystem (Bild 1.23). Die Fassadenpaneele bestanden aus zwei dünnen Stahldeckschichten, dessen Innenseiten mit 5 mm dicken Dämmstreifen beklebt wurden. Die verbleibende Kernschicht war mit losem Dämmstoff ausgefüllt. Es handelte sich folglich noch nicht um eine Sandwichstruktur im statischen Sinne, da die Blechlagen nicht schubsteif miteinander gekoppelt waren. (Bild 1.24). Das Beispiel zeigt aber bereits wesentliche Aspekte der Sandwichbauweise. Prouvé war konsequent an der Umsetzung einer integrierten Bauweise in der Fassadenebene interessiert, da die Bauteile einem breiten Anforderungsspektrum genügen mussten. Transport- und Montagevorteile waren gut nutzbar und große Flächen ließen sich mit baugleichen Elementen wirtschaftlich herstellen. Die beschriebene Form der Paneele gliederte die Fassadenfläche in vertikaler Richtung, lockerte diese auf und verliehen der Gebäudehülle so seine charakteristische architektonische Gestalt. Prouvé experimentierte später in den 50er-Jahren auch mit Aluminium-Hartschaum-Sandwichen.¹⁹

Zur gleichen Zeit wie Prouvé arbeitete der Ingenieur Hugo Junkers Anfang der Dreissiger Jahre an seiner Idee, Gebäude ausschließliche aus Metall zu bauen. Seine konstruktiven Ansätze basierten auf seinen Erfahrungen aus dem Flugzeugbau. Seine patentierte Hochbaukonstruktion war in Skelettbauweise mit geschosshohen Paneelen konzipiert. Die Paneele besaßen ähnlich wie bei Prouvé beiderseits eine dünne gewölbte Stahldeckschicht, die Kernschicht war hohl. Die Dämmung war auf der Innenseite des äußeren Deckblechs angeordnet. Er realisierte ab 1931 einige Häuser, so eine Fabrikspitzhalle, ein Tennis-Klubhaus für seine Familie sowie ein Pförtnerhaus, das heute noch in München-Allach in Benutzung ist.²⁰ Bis zu seinem Tod 1935 befasste sich Junkers intensiv mit doppelwandigen Leichtbaukonstruktionen. Die Elemente, die



Bild 1.23: Le Maison du Peuple, Clichy 1935-1939: Bürofassade mit Wandelementen als Vorstufe der Sandwichbauweise, entwickelt von Ateliers Jean Prouvé

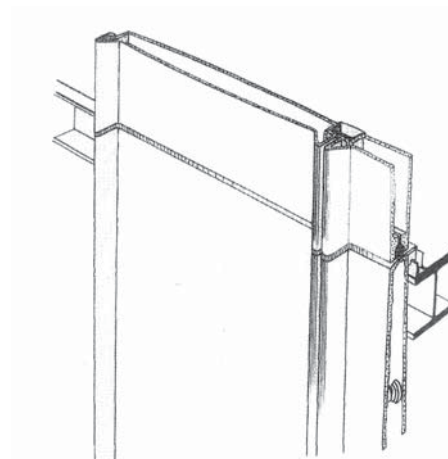


Bild 1.24: Isometrische Darstellung von Prouvé: Erkennbar sind die Stoßfugenaustrichtung und die nach außen gewölbten Deckschichten



Bild 1.25: Tennis-Klubhaus der Familie Junkers in Ganzmetallbauweise, Dessau 1931

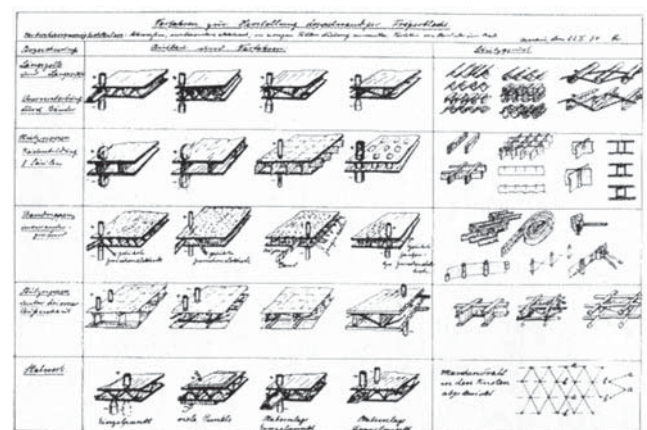


Bild 1.26: Skizzenblatt von Hugo Junkers zum Patent Nr. 642346 von 1937

17 [sul02] S.12

18 [sul02] S.117ff.

19 [sul02] S.6

20 [lau01] S.177ff.

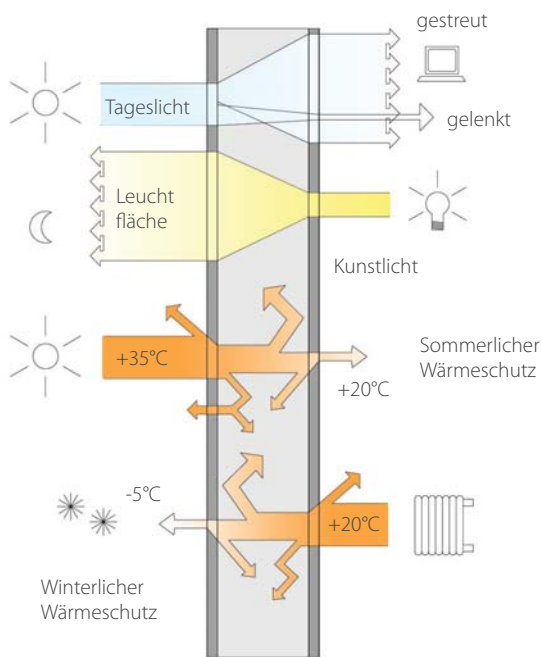


Bild 1.27: Die transluzente Sandwichstruktur als Strahlungsfilter: schematische Darstellung der Energieströme und die daraus resultierenden zusätzlichen Potentiale gegenüber opaken Sandwichen

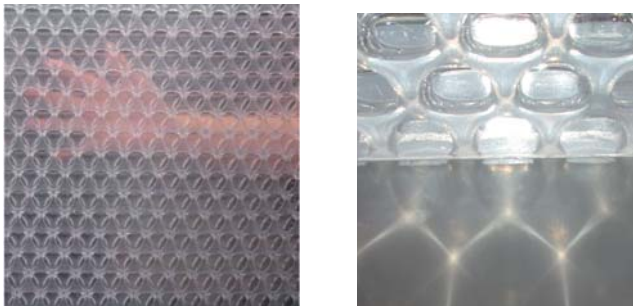


Bild 1.28: Visuelle Effekte von transluzenten Sandwichen: Schemenhaftigkeit, Brechung von Sonnenlicht. Wabenplatte „clear pep“



Bild 1.29: Mehrfachstegplatte aus Acrylglas mit stabilisierenden Stegen und zusätzlichen deckschichtparallelen Lagen in der Kernschicht

Junkers „Trägerlücke“²¹ nannte, entsprachen dem Strukturprinzip der Sandwichbauweise. Auf einem Skizzenblatt (Bild 1.26) sind seine Überlegungen zur Kombination von dünnen Metalldeckschichten und verschiedenen versteifenden Kernfüllungen festgehalten. Hierfür sah er bereits Wellbleche, prismenförmige Waben oder auch Stabwerke aus gefalteten Metallblechen als tragende Konstruktionselemente für Wände und Decken vor.

1.3 Transluzente Sandwichstrukturen

1.3.1 Allgemeines

Transluzente Sandwichstrukturen sind durch ihre Fähigkeit gekennzeichnet, in einem definierten Grad licht- bzw. strahlungsdurchlässig zu sein. Dies unterscheidet sie grundlegend von opaken Sandwichstrukturen. So können raumbegrenzende Flächen hergestellt werden, die einen großflächigen Licht- bzw. Energieaustausch zulassen.

1.3.2 Grundlegende Merkmale

Transluzente Sandwichstrukturen werden als ebene Plattenhalbzeuge unter verschiedenen Produktbezeichnungen hergestellt. Die Schichtkomponenten transluzenter Sandwichstrukturen bestehen in der Regel aus lichtdurchlässigen Werkstoffen. Hierfür kommen bisher transparente Kunststoffe wie Acrylglas, Polycarbonat und Faserverbundwerkstoffe mit transluzenter Matrix in Frage. Die Art der Schichtung und der Grad der Strahlungstransmission der Einzelschichten bestimmt das Transmissionsverhalten des Gesamtgefüges. Das Attribut „transluzent“ umschreibt hinreichend genau diese Gruppe von Sandwichstrukturen. Der Lichttransmissionsgrad des jeweiligen Gesamtgefüges wird durch folgende Parameter bestimmt:

- Transmissionsgrad Deckschichtmaterial
- Transmissionsgrad Kernschichtmaterial
- Kernstruktur
 - Geometrie
 - „Porösität“, bezeichnet den Volumenanteil des Werkstoffs am Kernvolumen, Wandungsdicken

- Ausbildung Schichtfuge

Art der Fügung: Schweißen, Kleben, Stoffschluß
 Größe der zur Verfügung stehenden, ebenen
 gleichen Kontaktfläche
 Lichttransmission des Fügwerkstoffs

Die Transmission von sichtbarem Licht korreliert gleichzeitig mit spezifischen Durchlässigkeiten anderer Strahlungsspektren wie Wärmestrahlung oder UV-Strahlung. Sie bestimmen das thermische Leistungsvermögen in Hinblick auf Wärmedämmung, stationären Wärmedurchgang oder sommerlichen Wärmeschutz. Das Sandwichsystem wirkt wie ein mehrschichtiger StrahlungsfILTER, der die Strahlungsanteile strukturabhängig reduziert, umlenkt, streut oder fokussiert (Bild 1.27-1.29).

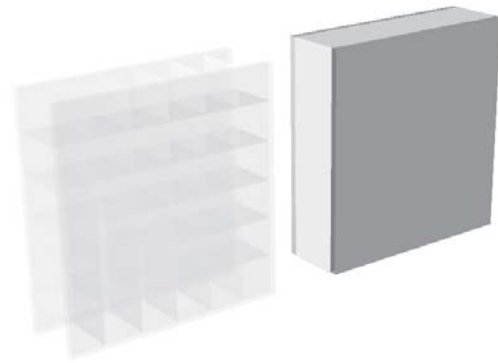


Bild 1.30: Prinzip der Auflösung: Deckschichten transluzent, Kernschicht strukturiert (links), opakes Sandwich (rechts)

1.3.3 Charakteristika des Strukturgefüges

Die Strukturform des Gesamtgefüges ist durch alle Schichten hindurch visuell wahrnehmbar. Vor allem die geometrische Struktur der Kernschicht bestimmt das Erscheinungsbild des Sandwichelements.

Die zur Nutzung des Sandwicheffekts idealerweise geforderte vollständige Verfüllung der Kernschicht mit einem leichten, porösen Werkstoff zur homogenen Versteifung des Gesamtgefüges (vgl. Kapitel 1.1) steht dem Ziel einer lichtdurchlässigen Ausbildung der Kernschicht aber grundsätzlich entgegen.

Dieser Zielkonflikt macht es daher notwendig, die Kernschicht aufzulösen. Der Grad der strukturellen Auflösung wirkt sich direkt auf die statisch-konstruktiven Eigenschaften aus. So gibt es eine breite Palette an marktgängigen Produkten, bei denen der strukturierte Kern in Form von Stegen, prismatischen Waben oder räumlichen Strukturen ausgebildet ist. Als lichtdurchlässige Kernwerkstoffe kommen überwiegend transparente Thermoplaste wie Acrylglas und Polycarbonat zum Einsatz. Diese ermöglichen durch thermische Umformung unterschiedlichste Strukturformen mit geringen Wandungsdicken bis unter 1 Millimeter. Außerdem verfügen die verwendeten Kunststoffe über ein geringes spezifisches Gewicht und sind im allgemeinen gut mit verschiedenen Deckschichtmaterialien verschweißbar bzw. verklebbar.

Schubsteife, dichtporöse Stoffe, die gleichzeitig lichtdurchlässig sind wie z.B. transluzente Schäume kommen

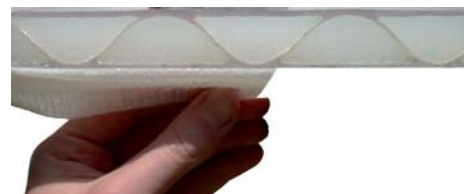


Bild 1.31: Hohlraumverfüllung der Kernschicht, hier zur Verbesserung der Wärmedämmfähigkeit. Oben: Verfüllung eines Wabenkerns
 Unten: Wellenstegplatte aus GFK mit Aerogel-Füllung (Scobalit)



Bild 1.32: Leuchtwand in einem Kaffeehaus in Wien (Querkraft Architekten): Die Hohlkammern der Einfachstegplatte aus Polycarbonat wurde mit Kaffeebohnen verfüllt und durch eine farbige Acrylglasplatte hinterleuchtet.



Bild 1.33: Tag- und Nachtansicht des Laban-Tanzcenters in London (Herzog & de Meuron 2002): Kombination farbiger Acrylglasstegeplatten und konventionellen Glasfenstern in der Fassade. Die Gliederung der Fassadenfläche wird durch die vertikalen Stoßfugen der schmalen Sandwichpaneelen bestimmt.

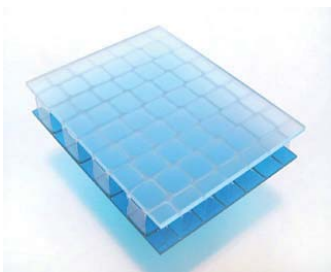


Bild 1.34: Schichtung von Decklagen unterschiedlicher Farbigkeit und Oberflächenstruktur: Wabenkern mit satinierten Acrylglasdeckschichten



Bild 1.35: Mikro- und Makrostruktur einer Fläche aus farbigen Doppelstegeplatten: „Kontaktflächen“ der Stege als parallele Linien, vertikale Stoßfuge mit integrierter „verdeckter“ Füge-technik (System Rodeca). Temporärer Eingangspavillon am Städel Frankfurt, 2005

als Kernschicht bisher nicht vor. Die strukturbedingten Hohlräume der Kernschicht lassen sich aber teilweise mit schüttfähigem Material verfüllen. So werden zum Beispiel Hohlkammern von Stegplatten mit „Aerogel“²² ausgefüllt. Durch das hochporöse lichtdurchlässige Granulat auf Silikatbasis lässt sich die Wärmedämmeigenschaft erheblich verbessern. Eine Hohlraumverfüllung als rein gestalterische Maßnahme wurde bei einer Leuchtwand aus Stegplatten in einem Kaffeehaus in Wien konzipiert: man wählte als Füllstoff Kaffeebohnen (Bild 1.32).

Aus herstellungstechnischen Gründen bestehen bei den meisten Produkten die Deckschichten auch aus Kunststoffen, häufig aus dem gleichen Material wie die polymere Kernschicht. Eine hohen Dehnsteifigkeit bzw. Festigkeit wird dadurch aber in den wenigsten Fällen erreicht. Aufgrund der dargelegten Merkmale ist die statisch-konstruktive Eignung der verschiedenen Sandwichsysteme sehr unterschiedlich zu bewerten.

1.3.4 Gestaltungsaspekte

Das durchscheinende Licht erweitert die Gestaltrelevanz von Sandwichstrukturen erheblich und verleiht dem Gesamtgefüge eine wahrnehmbare Tiefe. Neben den Deckschichten tragen Schichtfuge und polymere Kernschicht gleichermaßen zum Erscheinungsbild der Sandwichstruktur bei - im Gegensatz zu opaken Sandwichstrukturen, bei denen der Bereich zwischen den Deckschichten nicht sichtbar ist. Diese Eigenschaft lässt sich zur Gestaltung von Fassaden- oder Wandflächen gezielt einsetzen. Die Kombination von unterschiedlichen Farbigkeiten, Transluzenzen und Oberflächenstrukturen in den einzelnen Schichten und Ebenen in Verbindung mit unterschiedlichen Strukturformen des Kerns führt zu vielfältigen Ergebnissen der gestalterischen Ausprägung.

Die Flächenkontur der Kernschicht erzeugt in der transparenten Schichtfuge je nach Transmissionsgrad der Deckschichten eine mehr oder weniger kontrastreiche Mikrostruktur. Deren Maßstäblichkeit beeinflusst je nach Betrachterposition und den örtlichen Lichtverhältnissen das Erscheinungsbild der Gesamtfläche. So kann zum Beispiel ein feines, ungerichtetes Kernmuster aus kleinen

22 Aerogele werden hergestellt, indem ein Gel aus einem gallertartigen Stoff, meist Kieselsäure, unter extremen Bedingungen getrocknet wird. Sie sind unbrennbar, haben eine typische Dichte von 0,1 g/cm und verfügen über eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit [sco06]

Waben bei zunehmendem Betrachtungsabstand visuell zu einer homogenen Fläche verschmelzen, gerichtete bzw. gröbere Strukturen wie zum Beispiel dicke Parallelstege dagegen aus größerem Abstand weiterhin deutlich erkennbar bleiben (Bilder 1.35/1.36).

Die Verbindungstechniken der Platte selbst und der Platten untereinander bestimmen ebenfalls die Gestalt.

Es müssen Herstellverfahren verwendet werden, die einen homogenen Lichtdurchlaß durch die Schichtfuge gewährleisten, d.h. die Schweiß- oder Klebefuge sollte nach Aushärtung weiterhin transparent bzw. glasklar sein.

Die zu verkleidende Fläche ist aus mehreren Elementen zusammengesetzt. Aus dieser Elementierung resultiert der nutzbare Aktionsraum für die sichtbare Befestigung der Platten in den Stoßfugen untereinander sowie in der Befestigung an eine Unterkonstruktion. „Verdeckte“ Fügeprinzipien opaker Sandwichstrukturen werden sichtbar und bestimmen die wahrnehmbare Makrostruktur der Gesamfläche („Integrierte“ Sogankeranschlüsse bei Mehrfachstegplatten als dunkle Flecken wahrnehmbar, Bild 136).

Die Gliederung einer mit transluzenten Sandwichstrukturen gestalteten Fassade- oder Wandfläche wird also im wesentlichen durch die elementeigene Mikrostruktur, die durch externe Fügetechnik bedingte Makrostruktur sowie durch die gegebenenfalls dahinterliegende, sichtbare Unterkonstruktion bestimmt.

1.3.5 Bisherige Einsatzbereiche in Architektur und Design

Transluzente Sandwichstrukturen werden zum Beispiel für Gebäudehüllen verwendet. Aufgrund des mehrschichtigen Aufbaus nehmen die Fassadenflächen dabei eher den Charakter von Wänden denn von Verglasungen ein. Die Verwendung von Sandwichstrukturen ermöglicht am Tage die großflächige und gleichmäßige Belichtung hoher und tiefer Innenräume, zum Beispiel von Hallenbauten. In der Dunkelheit wechselt der Lichtstrom seine Richtung, das durch Kunstlicht illuminierte Gebäude wird zum weit hin sichtbaren Leuchtkörper. Für Fassaden von Sporthallen oder Industriehallen werden bevorzugt transluzente Sandwichstrukturen aus Polycarbonat verwendet, da dieser Werkstoff über eine hohe Schlagzähigkeit verfügt.

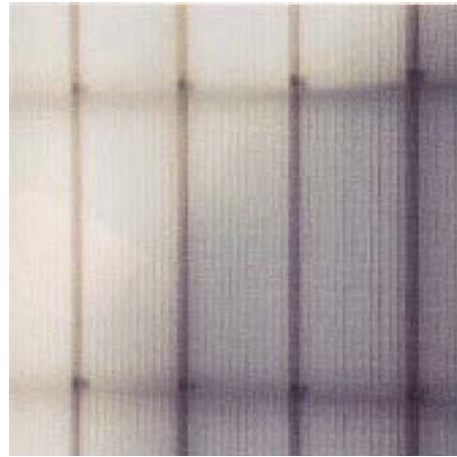


Bild 1.36: Mikro- und Makrostruktur einer Fassade aus farblosen Mehrfachstegplatten mit dahinterliegender Holz-Unterkonstruktion, Wohn- und Atelierhaus Köln



Bild 1.37: Temporäres Abfertigungsgebäude am Flughafen Wien-Schwechat mit hinterlüfteter und bedruckter Stegplatten-Hülle. Die vertikalen Stoßfugen und die horizontale Unterkonstruktion gliedern die Fassade.



Bild 1.38: Wohn- und Atelierhaus in Gleißenberg mit Gebäudehülle aus transluzenten Sandwichstrukturen (Architekt Florian Nagler): Nacht- und Tagansicht



Bild 1.39: Messestand CAFIM auf der „Sasmil“ in Mailand 2004 (Egidio Panzera) aus hinterleuchteten Wabenpaneelen



Bild 1.40: DEI - Ladendekoration in Mailand: Einsatz farbiger Wabenpaneelen

Für großflächige Überdachungen von Sportstadien, Verkehrsbauten oder offenen Lagergebäuden sowie als Oberlichtbänder eignen sich transluzente Sandwichstrukturen ebenfalls, da sie eine blendfreie Versorgung mit Tageslicht über die Dachfläche ermöglichen. Auch im klassischen Büro- und Wohnungsbau werden vereinzelt transluzente Sandwichstrukturen als Fassadenmaterial verwendet (vgl. Kapitel 2.3), um eine gleichmäßige und blendfreie Tageslichtnutzung vor allem tiefer Räume zu ermöglichen und eine Blickdichtheit zur Wahrung innenräumlicher Privatsphäre zu gewährleisten.

Aufgrund des hauptsächlichen Einsatzes polymerer Werkstoffe ergeben sich Transport- und Montagevorteile aufgrund des geringen Gesamtgewichts. Gerade für temporär genutzte Bauwerke ist dieser Aspekt vorteilhaft. Da alle Schichten der Sandwichstruktur mehr oder weniger visuell wahrnehmbar sind und durch Licht „inszeniert“ werden können, offenbaren sich wie bereits gezeigt eine Reihe an Gestaltungspotentialen, die zu einer individuellen Ästhetik führen können. Dieser Aspekt macht transluzente Sandwichstrukturen im Messe- und Innenausbau attraktiv, ergänzt durch die Tatsache, dass sich durch den Einsatz von Kunstlicht leuchtende Flächen und Räume herstellen lassen (Bilder 1.39/1.40).

Anhand einer typologischen Übersicht und ausgewählter Projektbeispiele werden im folgenden Kapitel verschiedene Plattentypen transluzenter Sandwichstrukturen aufgezeigt und hinsichtlich ihrer Eigenschaftsprofile verglichen.

2. Typologie und bisherige Verwendung

2.1 Kriterien der typologischen Einordnung

2.1.1 Produktrecherche

Transluzente Sandwichstrukturen werden fast ausschließlich als plattenförmige Halbzeuge bzw. Bauelemente vorgefertigt und als Plattenware oder Bausystem angeboten. Bei allen Produkten besteht mindestens die Kernschicht aus transparentem bzw. transluzentem Kunststoff. Aufgrund unterschiedlicher Schichtmaterialien, Bauformen und Abmessungen gibt es eine breite Palette an verschiedenen Plattentypen und Untertypen, entsprechend viele verschiedene Hersteller bieten teilweise ähnliche Produkte mit unterschiedlichen Produktbezeichnungen und Vertriebswegen an. Die verschiedenen Plattentypen sind eng mit den Produktmarken verknüpft, sie verfügen über marketingübliche Kunstnamen wie „Scobatherm“, „Picolit“ oder „Makrolon“, die über das Bauelement an sich wenig aussagen. Bei der Produktrecherche fiel auf, dass im allgemeinen Sprachgebrauch alle transluzenten Sandwiches irrtümlicherweise als Stegplatten bezeichnet werden. Bei der durchgeführten Analyse war es daher notwendig, eine differenzierte Betrachtungsweise zu entwickeln, die auf typologische Gemeinsamkeiten und Unterschiede abzielt und dabei die jeweiligen Produktbezeichnungen bewußt auszublenden versucht.



Bild 2.01: Plattentypen

2.1.2 Prozess-Eigenschaftsbeziehungen

Die Aufstellung einer Typologie erfordert die Wahl geeigneter Haupt- und Nebenkategorien. Nicht zuletzt aufgrund des Untersuchungsschwerpunktes der „konstruktiven Eignung“ orientieren sich die gewählten Gliederungsprinzipien am strukturellen Aufbau der Sandwichplatte. Dessen Morphologie ist, wie im Diagramm in Bild 2.02 zu erkennen, maßgeblich durch den jeweiligen Fertigungsprozeß gekennzeichnet, bei dem bereits alle grundlegenden Eigenschaften und das typische Erscheinungsbild festgelegt werden. Dieser Zusammenhang wird in der Folge als Prozess-Eigenschaftsbeziehung bezeichnet. Das Diagramm zeigt die Beziehung zwischen den Schichtkomponenten und den jeweilig zur Anwendung kommenden Herstellungsmethoden. Wie in Kapitel 1.3.2 bereits aufgezeigt wird hier besonders deutlich, dass die Struktur der Kernschicht die grundlegenden Eigenschaften des Gesamtgefüges bestimmt und dadurch die typologische Gliederung diktiert.

Der Prozess der Fertigung besteht im allgemeinen aus zwei Arbeitsschritten. Im ersten Schritt erfolgt die Fertigung der polymeren Kernschicht. Der Fertigungsprozess ist gezielt auf die Formbarkeit von Kunststoffen ausgelegt. So lassen sich Acrylglas und Polycarbonat kalt, vor allem aber thermisch sehr gut umformen, glasfaserverstärkte Kunststoffe dagegen durch Laminierung vor Aushärtung der Harzmatrix in die gewünschte Form bringen. Der gefertigte Kern wird als flächiges „Halbzeug“ in einem zweiten Prozessschritt mit den Deckschichten verbunden. Bei der schubsteifen Ausbildung der Schichtfuge ist zwischen stoff- und kraftschlüssigen Verbundtechniken zu unterscheiden. Additive Techniken wie Klebung oder Verschweißung sind kraftschlüssig. Bei integrierten Herstellungsverfahren wie bei der thermischen Strangpressung von Parallel- und Hybridstegplatten sind beide Arbeitsschritte sogar zu einem zusammengefasst: Deckschicht und Kern werden im stoff-

PROZESS · EIGENSCHAFTSBEZIEHUNGEN

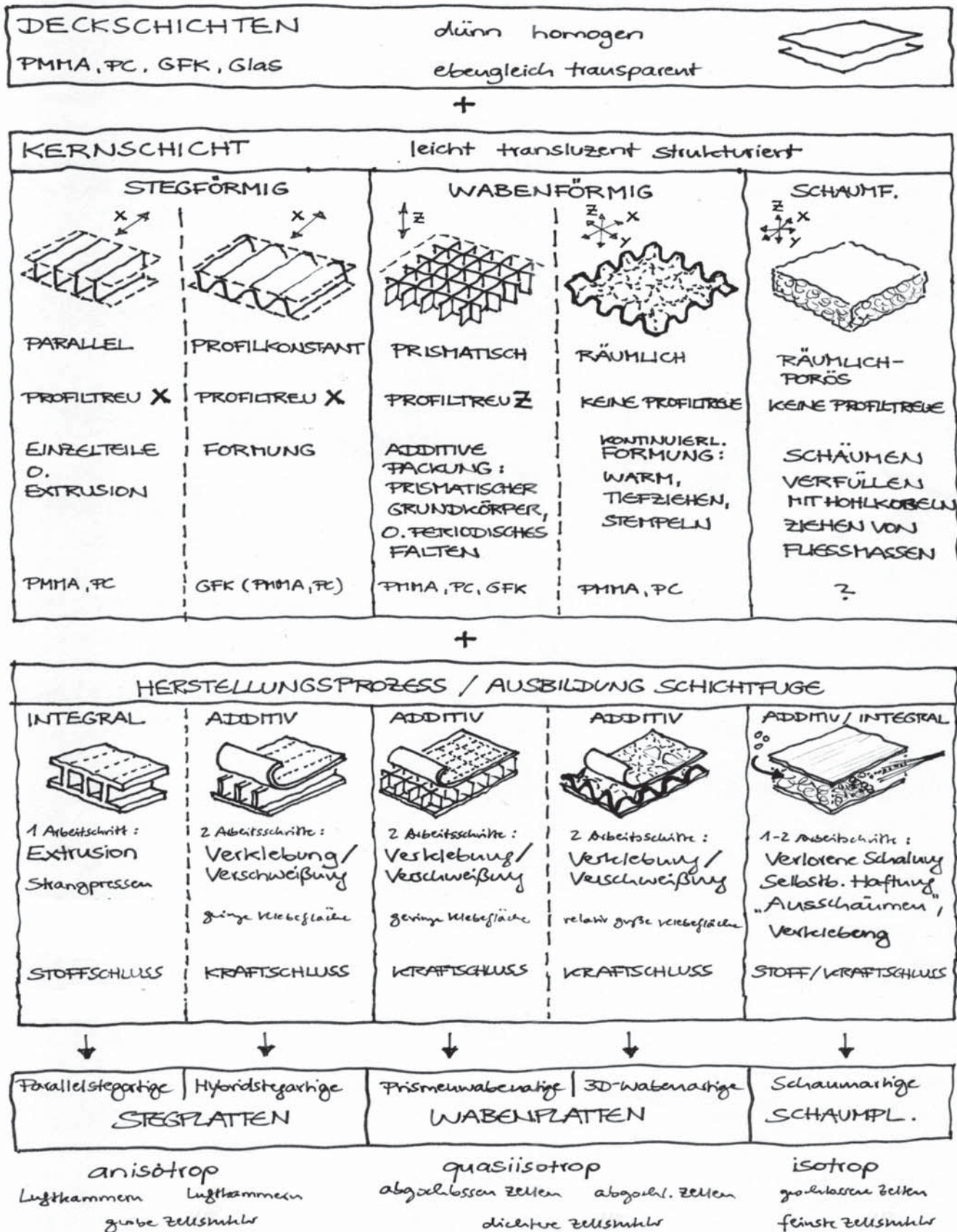


Bild 2.02: Diagramm „Prozess-Eigenschaftsbeziehungen“

schlüssigen Verbund aus zähflüssigem Acrylglas oder Polycarbonat als gerichtetes Extrusionsprofil in einem Arbeitsgang hergestellt.

Transluzente Sandwichstrukturen lassen sich nach dem Diagramm in Bild 2.02 in die drei Hauptgruppen Stegplatten, Wabenplatten und Schaumplatten aufteilen. Der jeweilige Fertigungsprozess bestimmt folgende grundlegende Merkmale:

Stegplatten sind gerichtet und profiltreu parallel zur Fläche (in X-Richtung, vgl. Bild 2.02), verfügen über eine grobe Zellstruktur und voluminöse Luftkammern. Sie besitzen ein anisotropes Materialverhalten. Die Schichtfuge ist in den meisten Fällen stoffschlüssig ausgebildet.

Wabenplatten sind ungerichtet, verfügen über eine dichtere Zellstruktur und kleine, für sich abgeschlossene Luftzellen. Sie haben ein quasiisotropes Materialverhalten. Die Schichtfuge zwischen Kern und Deckschicht ist additiv ausgebildet. Prismatische Wabenstrukturen sind profiltreu quer zur Fläche (in Z-Richtung), räumliche Wabenstrukturen zeigen keine Profiltreue.

Schaumplatten sind ungerichtet, verfügen über eine sehr dichte Zellstruktur mit abgeschlossenen, porenförmigen Luftzellen. Sie verfügen über ein isotropes Materialverhalten. Die Schichtfuge ist je nach Herstellungsprinzip stoffschlüssig (materialgleiches Ausschäumen) oder kraftschlüssig (Ausfüllen). Schäume sind nicht profiltreu. Die hier aus gliederungslogischen Gründen aufgeführten Schaumplatten haben jedoch rein hypothetischen Charakter. Die Produktrecherche hat ergeben, dass es bisher noch kein Sandwichprodukt gibt, das schaumartig und dabei hochgradig lichtdurchlässig ist.

Die Packungsdichte der jeweiligen Zellstruktur nimmt im Diagramm von links nach rechts zu, ebenso die Vernetzungsdichte Kern-/Deckschicht zur schubsteifen Koppelung. Die Gruppe der Schaumplatten entspräche strukturmorphologisch den optimalen Grundsätzen der Sandwichbauweise, die Stegplatten entsprechen diesen am wenigsten. Es wird angenommen, dass sich das statisch-konstruktive Verhalten ebenfalls nach rechts verbessert. Die auf dem Markt zur Verfügung stehenden Produkte lassen sich daher alle den Hauptkategorien der Steg- und Wabenplatten zuordnen.

2.1.3 Polymere Werkstoffe

Bei der Analyse der unterschiedlichen transluzenten Sandwichprodukte fielen folgende grundsätzliche Dinge auf: Die polymeren Grundwerkstoffe werden entweder im Betrieb selbst hergestellt oder als plattenförmige Halbzeuge eingekauft und weiterverarbeitet. Für die Fertigung der Kernschicht kommen bei allen Sandwichtypen ausschließlich polymere Werkstoffe wie Polymethylmethacrylat (Acrylglas) sowie Polycarbonat oder glasfaserverstärkte Kunststoffe zur Anwendung. Meist bestehen sowohl Deckschicht als auch Kernschicht aus dem gleichen Grundwerkstoff, die Verbundkombination unterschiedlicher transluzenter Werkstoffe wird nur selten angeboten, deren Möglichkeit ist aber in den meisten Fällen erwähnt.

- Polymethylmethacrylat und Polycarbonat

Polymethylmethacrylat (in der Folge abgekürzt mit „PMMA“) ist ein Thermoplast und als Werkstoff unter der Handelsbezeichnung „Plexiglas“¹ bekannt. Besonders hervorgehoben wird die sehr gute Witterungs- und Altersbeständigkeit und die glasklare Transparenz. Seine durchschnittliche Rohdichte beträgt $1,19 \text{ g/cm}^3$ und ist damit etwa halb so groß wie die von Glas. Wie die meisten thermoplastischen Kunststoffe besitzt PMMA eine relativ hohe Wärmeausdehnung von ca. 3 mm pro Meter bei 50 K Temperaturdifferenz. Die Gebrauchstemperatur liegt zwischen -40°C und ca. 80°C und liegt damit im Bereich für bauliche Anwendungen. Ab ca. 100°C lässt sich PMMA thermisch umformen. PMMA transmittiert grundsätzlich UV-Strahlung. Es lässt sich gut spanend bearbeiten, verschweißen und verkleben. Die hohe Spannungsrißempfindlichkeit erfordert jedoch die Auswahl geeigneter Klebstoffe. PMMA kann bei Verarbeitung zu Halbzeugen mit Farbpigmenten versehen oder durch Beimischung schlagzäh modifiziert werden. Oberflächen können mattiert, kaschiert, bedruckt oder beschichtet werden. PMMA brennt ohne Rauchentwicklung und ist in Deutschland der Brandschutzklasse B2 „normal brennbar“² zugeordnet.

Polycarbonat (PC) ist ebenfalls ein Thermoplast und ist in transparenter Form unter den Handelsbezeichnungen „Makrolon“ oder „Lexan“³ bekannt. PC zeichnet sich durch seine bessere Temperaturbeständigkeit bis 130°C aus. Es ist relativ hart und besitzt eine sehr hohe Schlagfestigkeit. PC benötigt zur UV-Stabilisierung eine Oberflächenbeschichtung oder eine Beimischung entsprechender Pigmente, um witterungs- und alterungsbeständig zu sein. Alle sonstigen technischen Eigenschaften entsprechen in etwa den Werten von PMMA, ebenso die Be- und Verarbeitungsmöglichkeiten. Bei größeren Schichtdicken ab ca. 4 mm und durch Vorrecken kann PC der Brandschutzklasse B1 „schwer entflammbar“ zugeordnet werden.

- Weitere transluzente Thermoplaste

Als Werkstoffe werden bei einigen Produkten auch Polyethylenterephthalat (PET) und Polypropylen (PP) verwendet. Beide gelten als witterungsbeständig, haben eine hohe Lichtdurchlässigkeit und gelten als normal brennbar. Hauptabnehmer ist die Verpackungsindustrie, weil sich die beiden Werkstoffe sehr gut zur Extrusion von dünnen Folien eignen. Diese Eigenschaft macht sie für die Herstellung transluzenter Wabenkerne interessant.

- Glasfaserverstärkte Kunststoffe

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) werden vor allem in der Luftfahrt- und Automobilindustrie eingesetzt. Für die Anwendung in transluzenten Sandwichstrukturen muss die Harzmatrix lichtdurchlässig sein. Übliche im Bauwesen verwendete GFK haben einen Kurzfasergehalt von ca. 30% und ein spezifisches Gewicht von $1,8\text{--}2,0 \text{ g/cm}^3$. GFK sind temperaturbeständig und besitzen eine höhere Materialsteifigkeit. Das Harz besteht meist aus Duroplasten wie Polyester oder Polyurethan und ist nach Aushärtung nicht weiter umformbar. Um Vergilben und Verspröden der Matrix zu verhindern, wird auf die Außenseite häufig eine UV-Schutzfolie laminiert. Die Matrix kann aber auch aus Thermoplasten, zum Beispiel Polypropylen bestehen. Solche Faserverbunde lassen sich thermisch umformen.

1 Handelsbezeichnung der Firmen Röhm [röh06] und Altuglas Int.

2 gemäß DIN 4102-1

3 Handelsbezeichnungen der Firmen Bayer [bay06] und General Electric

2.2 Typologie

Auf Grundlage der vorgestellten Gliederungsprinzipien und einer umfangreichen Marktrecherche ergibt sich folgende Typologie für transluzente Sandwichstrukturen:

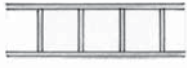


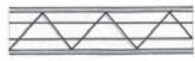





Hauptkategorie	Nebenkategorie	Unterkategorie	Profilschnitt
Stegplatten	Parallelstegplatten	Hohlkammerplatten	
		Mehrfachstegplatten	
	Hybridstegplatten	Rautenstegplatten	
		Multistegplatten	
	Wellenstegplatten		
Wabenplatten	Prismenwabenplatten	Tubuswabenplatten	
		Polygonalwabenplatten	
		Faltwabenplatten	
	Platten mit räumlich strukturiertem Wabenkern		

Bild 2.03: Typologische Gliederung transluzenter Sandwichstrukturen

Die Profilschnitte zeigen noch einmal sehr deutlich den Einfluss der Profiltreue auf die Gestalt der Platten. Während die Stege ein regelmäßiges prismatisches Profil im Plattenquerschnitt erzeugen, ist das prismatische Profil der Wabenplatten im rechten Winkel zur Fläche orientiert. Lediglich bei den räumlich strukturierten Wabenplatten variiert das Profil sowohl parallel als auch quer zur Fläche.

Ebenfalls erkennbar ist die Diskrepanz der zur Verfügung stehenden Kontaktfläche zwischen Deckschichten und Kern. Die dünnen, auf Abstand gestellten Stege der Parallelstegplatten verfügen über wenig Anschlussfläche, während die Wabenplatten, besonders die räumlich strukturierte Wabenplatte einen großen Kontaktflächenanteil bei gleichmäßiger Verteilung besitzen.

Basierend auf der vorgestellten Typologie wurden verschiedene Produkte analysiert und verglichen. Bild 2.04 zeigt eine Auswahl von beispielhaften Produkten einen Überblick zu den wesentlichen technischen Eigenschaften der einzelnen Plattentypen. Im folgenden werden die einzelnen Plattentypen abschnittsweise hinsichtlich ihrer technischen und gestalterischen Eigenschaften genauer vorgestellt und eine erste Einschätzung in Bezug auf ihre konstruktive Eignung gegeben.

2.2.1 Typologischer Vergleich ausgewählter Produkte


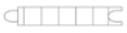

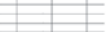












Plattentyp (gem.. Unterkategorie)		Herstellung	Werkstoff Deckschicht / Kern	Wichte [kg/m ²]	Dicke [mm]	max.Platten- maß [mm]
Stegplatten transluzent	Hohlkammerplatten					
	Plexiglas SDP 16-32/64 	Extrusion	PMMA	5,0	16	1200 x 7000
	Rodeca PC 2216-2 C mit UV-Coex 	Extrusion	PC	2,7	16	215 x 11000
	Mehrfachstegplatten					
	Plexiglas Resist S4P-32/1230-32 farblos 	Extrusion	PMMA	5,7	32	1230 x 7000
	Makrolon multi UV 6/20-20 	Extrusion	PC	3,1	20	1230 x 6000
	Rodeca PC 2540-6 	Extrusion	PC	4,2	40	500 x 11000
	Rauten- und Multistegplatten					
	Makrolon multi UV 5X/40-25 clear 	Extrusion	PC	4,2	40	1230 x 6000
	Quinn SPC 35 Diamond 6-fach clear 	Extrusion	PC	4,0	35	1200 x 6000
Wabenplatten transluzent	Wellenstegplatten					
	Scobalit „Lichtelement ILE“ 	Kleben	GFK	9	30	2400 x 8000
	Scobalit „Scobatherm Nanogel“ 	Kleben	GFK+Nanogel	12	50	2400 x 8000
	Tubuswabenplatten					
	Design Composite Air-Board UV PC 19 	Kleben	PC / PC	5,9	19	3020 x 1220
	Design Composite Air-Board UV PC 40 	Kleben	PC / PC	7,3	40	3020 x 1220
	Polygonalwabenplatten					
	Wihag 30-MonoPan PP80 TN0.7 	Schweißen	GF+PP / PP	4,8	30	2750 x 13600
	Faltwabenplatten					
	Wacotech ViewPan PMMA-18/s (innen) 	Kleben	PMMA / PET	5,6	40	3000 x 1000
	Platten mit räumlich strukturiertem Wabenkern					
	Design Composite clear-pep UV PC 19 	Kleben	PMMA+ / PC	8,5	19	3020 x 1220
	Design Composite clear-pep UV PC 40 	Kleben	PC / PC	9,7	40	2000 x 1000
	Design Composite clear-pep UV PC 80 	Kleben	PMMA+ / PC	10,9	80	3020 x 1220

Bild 2.04: Alle Angaben gemäß Produkthersteller (vgl. Kapitel 7), * selbst ermittelte Werte bzw. Angaben, teilweise geschätzt

Wandungs- dicken Decks. / Kern [mm] *	Zellgrößen ** [mm]	Werkstoff- volumen Kern *	U-Wert [W/m²K]	Licht-/UV- durchlaß τ_{D65} [%]	Energie- durchlaß [%]	Brandschutz DIN 4102-1 ***	Befüllung möglich *	Prinzip Fügung *
1,5	32/64	~ 5 % / 2 %	2,5	~ 82 / 100	~ 91	B2	ja	extern
0,5 - 1	20	~ 6 %	2,8	~ 80 / 0	~ 80	B1/B2	ja	integriert
1,5 / 0,5 - 1,5	32	~ 8 %	1,6	74 / 0	69	B2	ja/nein	extern
0,5 - 1	20	~ 5 %	1,7	~ 70 / 0	~ 70	B1-B2	nein	extern
0,5 - 1	40	~ 8 %	1,2	~ 45 / 0	~ 45	B1-B2	nein	integriert
0,5 - 1	< 12	~ 20 %	1,2	~ 33-54 / 0	~ 33-54	B2 (B1)	nein	extern
0,5 - 1	15	> 20 %	1,4	~ 34-56 / 0	~ 29-50	B1	nein	extern
2 / 1,5	68	~ 10 %	~ 2,3	~ 75 / 0		B2 (B1)	ja	extern
2 / 1,5	68	~ 10 %	0,4	~ 27 / 0	~ 25	B1	Nanogel	extern
2 / ~ 0,5	~ 6	~ 8 %	2,2	~ 63 / 0	~ 52-72	B1	nein	extern
2 / ~ 0,5	~ 6	~ 8 %	1,3	~ 51 / 0.	~ 40-55*	B1	nein	extern
0,7 / ~ 0,7	~ 6	~ 20 %	2,2	k.A. / 0	k.A.	B2 (B1)	nein	extern
2 / 1	18	~ 10 %	k.A.	k.A.	k.A.	B1-B2	nein	extern
0,5 - 2	~ 20	~ 19 %	2,9	~ 63 / 0	~ 42-62	B1-B2	nein	extern
0,5 - 2	~ 20	~ 10 %	1,8	~ 30 / 0	k.A.	B1	nein	extern
0,5 - 2	~ 20	~ 6 %	1,1	k.A.	k.A.	B1	nein	extern

** Zellgröße: Bei Stegplatten der größte gemessene Abstand der Stege untereinander, bei Wabenplatten das größte gemessene Rastermaß der Waben

*** Brandschutzklasse in Klammern durch Ausstattung des Werkstoffs mit einem Flammschutzmittel

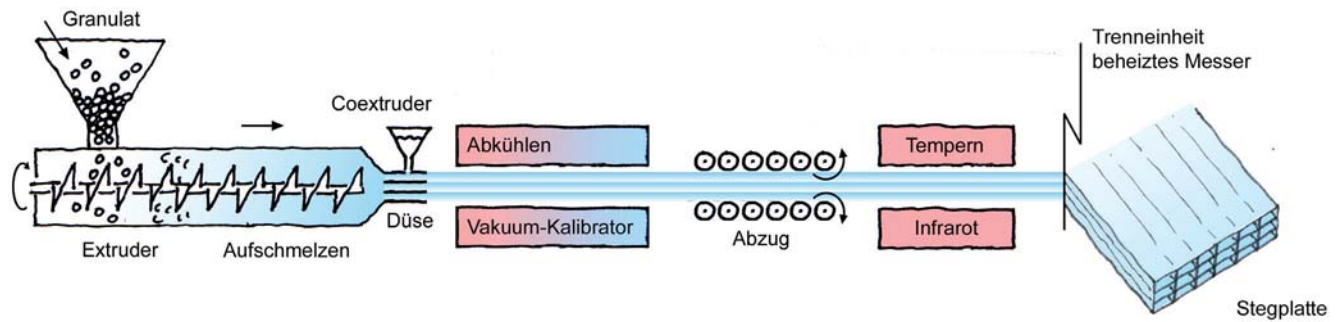


Bild 2.05: Prinzip Extrusionsverfahren zur Herstellung von Stegplatten aus thermoplastischen Kunststoffen

2.2.2 Stegplatten

Bei Stegplatten sind die ebenengleichen Deckschichten in regelmässigen Abständen durch dünne Stege miteinander verbunden. Die geometrische Anordnung der Stege ist vielfältig. Alle Stegplattentypen haben aber gemeinsam, dass sie über eine geometrische Profiltreue in Längsrichtung verfügen und die Stege eben sind.

Die Profiltreue bildet die verfahrenstechnische Grundlage des Extrusionsverfahrens. Das Verfahren wurde erstmals Anfang der Fünfziger Jahre für Polycarbonate und Polymethylmethacrylate verwendet. 1971 brachte die Firma Röhm die erste Doppelstegplatte aus „Plexiglas“ auf den Markt. Als Stärken nennt der Hersteller Bayer in einer Online-Publikation⁴ beliebig herstellbare Plattenlängen, den großen Variationsbereich möglicher Steggeometrien und Schichtdicken sowie die Ausstattung mit weiteren Attributen wie Farbigkeit oder Oberflächenbeschichtung. Andere Hersteller wenden dieses Herstellungsprinzip ebenfalls an.

Bild 2.05 zeigt das Prinzip des Extrusionsverfahrens. Es handelt sich um einen thermischen Umformprozess, daher eignen sich für die Herstellung ausschließlich Thermoplaste. Überwiegend kommen Polycarbonat und Polymethylmethacrylat zur Anwendung, wenige Hersteller bieten auch Stegplatten aus Polyvinylchlorid (PVC) oder Polyethylen (PET) an. Die Grundwerkstoffe werden als Granulat in einem Extruder bei ca. 250-280°C aufgeschmolzen. Das viskos-amorphe Material wird durch eine Stegplattendüse gedrückt und dadurch in Form gebracht. In dieser Phase findet auch die Koextrusion von optionalen Oberflächenbeschichtungen für UV-Schutz, Kratzschutz oder andere Veredelungen statt. Das Düsenwerkzeug (Bild 2.06) besteht aus Staubalken und Düsenlippen, die als Negativform das geometrische Profil der Stegplatte

bestimmen. Ein hinter dem Düsenauslaß angeordneter Vakuum-Kalibrator sorgt für eine kontrollierte, stufenweise Abkühlung. Durch Tempern, also kurzzeitiges Wiedererwärmen der Platte werden innere Spannungen beseitigt. Die Qualität des Endprodukts hängt dabei von folgenden Faktoren ab: Eine Erhöhung der Abziehggeschwindigkeit steigert grundsätzlich die strukturelle und visuelle Qualität der Platte. Je dicker die Platte ist, desto geringer muss jedoch die Abzugsgeschwindigkeit sein, um Zwängungsspannungen und damit eine Welligkeit in Querrichtung zu vermeiden. Das gleiche gilt für die Wandungsdicken der Deckschichten und der Stege. Der Vergleich verschiedener Produkte zeigt, dass mit Polycarbonat geringere Wandungsdicken als mit Acrylglas erzielt werden können. Bei näherer Betrachtung des Schnittprofils in Bild 2.07 fällt auf, dass die Übergänge Steg-Deckschicht in der Regel abgerundet ausgebildet sind, um Kerbspannungen aufgrund zu scharfkantiger Innenecken zu vermeiden. In den Extrusionsanlagen sind Stegplatten bis zu einer Gesamtdicke von etwa 40 mm herstellbar. Die Fließkanalgeometrien der Stegdüsen lassen bisher maximale Breiten von 2100 mm zu, handelsüblich sind 980 mm bzw. 1200 mm.

Das Extrusionsverfahren ist ein vollautomatisierter Prozess. Das Verfahren ermöglicht eine Endlosproduktion, die sehr wirtschaftlich ist und Stegplatten zu vergleichsweise günstiger Plattenware macht. Effektiv sind bis zu 11 Meter lange Einzelelemente möglich. Da das Endprodukt aus „einem“ Grundwerkstoff ohne Schichtfuge besteht, ist es im Werkstoffkreislauf wiederverwendbar und kann als Granulat dem Produktionsprozess erneut zugeführt werden.

Stegplatten lassen sich grundsätzlich auch durch additive Fügung von Stegen oder profiltreuen Kernquerschnitten mit flächigen Deckschichten herstellen. Dieses Fertigungsverfahren wird aber eher selten angewendet, da der technische Aufwand verhältnismäßig groß ist und die zur Verfügung stehende Kontaktfläche zur Ausbildung der schubsteifen Schichtfuge durch Klebung oder Schweißung sehr gering ist. Es kommt vornehmlich für Sandwichsysteme zum Einsatz, bei denen sich die Grundwerkstoffe nicht thermisch umformen lassen wie zum Beispiel bei faserverstärkten Kunststoffen, oder bei Kombination unterschiedlicher Grundwerkstoffe.

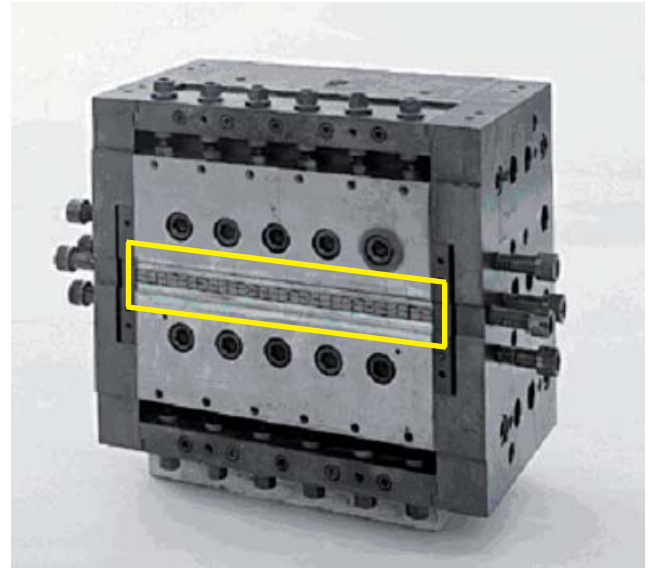


Bild 2.06 Stegplattendüse einer Extrusionsanlage von BayerSheetEurope

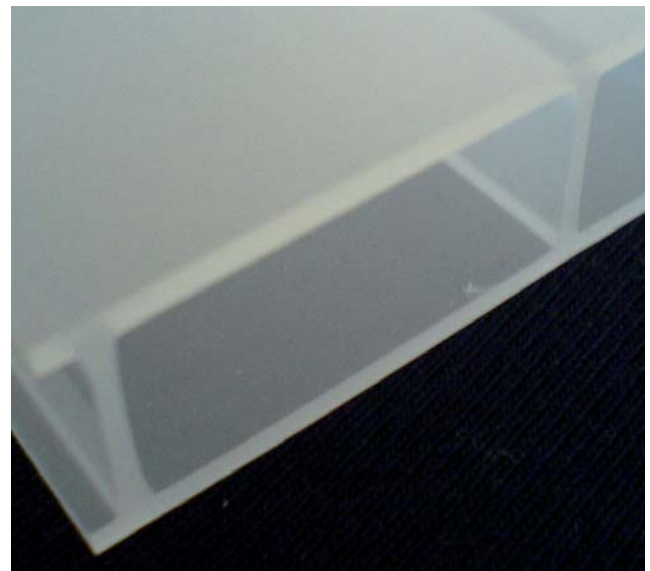


Bild 2.07: Profil einer extrudierten Hohlkammerplatte aus PMMA: Stege und Deckschichten haben hier gleiche Wandungsdicken, die Innenkanten zwischen Steg und Deckschicht sind abgerundet

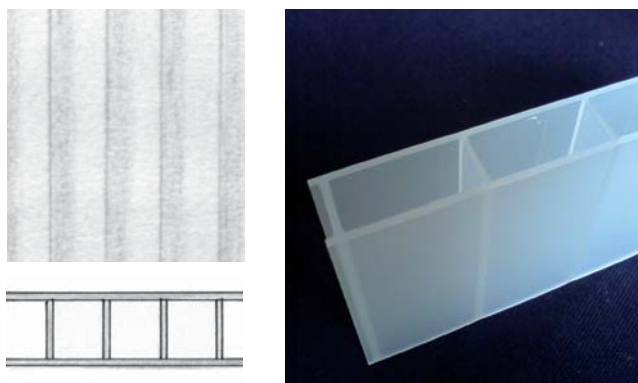


Bild 2.08: Hohlkammerplatte; links: Mikrostuktur in Ansicht und Querschnitt, rechts: Plexiglas HKS 16-32 (Fa. Röhm) aus satiniertem Acrylglas mit einem Stegabstand von 32mm

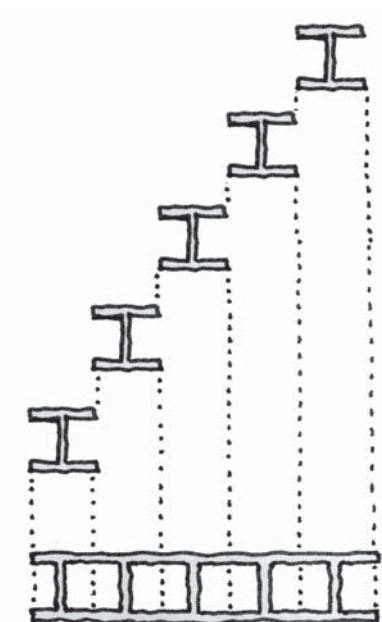


Bild 2.09: Strukturanalogie Hohlkammerplatte - I-Profil

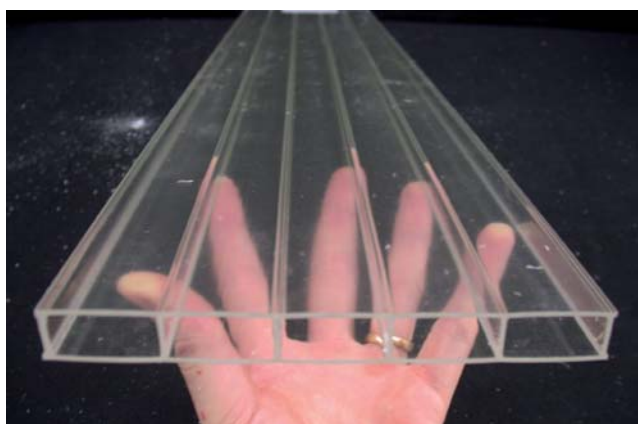


Bild 2.10: Hohlkammerplatte der Firma Röhm mit 16mm Dicke und Stegabstand von 32mm aus transparentem Acrylglas (PMMA)

2.2.2.1 Parallelstegplatten

Parallelstegplatten sind durch eine gleichmäßige, parallele Anordnung der Stege im rechten Winkel zu den Deckschichten gekennzeichnet. Die Herstellung erfolgt durch Extrusion von PC oder PMMA. Diese Werkstoffe sind der Brandklasse B2 „normal entflammbar“⁵ zugeordnet. Stegplatten aus Polycarbonat mit größeren Plattendicken sowie aus PET und PVC sind herstellerabhängig der Brandklasse B1 „schwer entflammbar“ zuzuordnen. Generell schmelzen Stegplatten aus Thermoplasten im Brandfall auf und können so zur Entrauchung beitragen. PMMA verbrennt zudem ohne Rauchentwicklung.

- Hohlkammerplatte

Die Hohlkammerplatte ist der einfachste Stegplattentyp. Zwei transluzente Deckschichten sind durch vertikale Stege miteinander verbunden. Es entstehen rechteckige Hohlkammern. Die Platte lässt sich auch als kombinierte Anordnung von Doppel-T-Profilen beschreiben, bei denen die Flansche die Deckschichten bilden (Bild 2.09). Hohlkammerplatten bieten von allen transluzenten Sandwichstrukturen die größte Transparenz mit Blickdurchlässigkeit bei Verwendung von glasklarem PMMA (Bild 2.10).

Plattendicke, Stegabstand und die Wandungsdicken bestimmen die statisch-konstruktiven Eigenschaften der Platte. Ein großer Abstand der Stege vergrößert die Beul- und Knittergefahr der Deckschichten. Eine große Plattendicke vergrößert die Beulgefahr der Stege, da diese nur an ihren Enden von den Deckschichten gehalten werden. Aus diesem Grund sind die Wandungsdicken von Deck- und Kernschicht vergleichsweise hoch und liegen etwa bei 1,5 - 3 mm. Die größten verfügbaren Plattendicken für Hohlkammerplatten aus PMMA und PC liegen bei etwa 30 mm.

Aufgrund des strukturellen Aufbaus sind die bauphysikalischen Qualitäten eingeschränkt. Die transmittierende Strahlung muss lediglich zwei Deckschichten durchdringen. Die stabförmige Hohlkammer ist zu groß als dass sie als ruhende Luftschicht wirksam werden könnte. Zudem lassen sich keine abgeschlossenen Luftvolumina herstellen, da die Stirnseiten schwer abzudichten sind. Feuchtigkeit kann relativ leicht in die Kernschicht eindringen. Die Hersteller weisen in ihren Produktbeschreibungen⁶

5 gemäß DIN 4102 Teil 1

6 BayerSheetEurope und Röhm [Bay06, Röho6]

explizit darauf hin, im eingebauten Zustand für Entwässerung und Belüftung des Kernzwischenraums zur Abfuhr von Feuchtigkeit zu sorgen. Die Wärmedurchgangskoeffizienten sind folglich mit maximal $2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ für Anwendungen in der Gebäudehülle als ungünstig zu bewerten.

Die Lufträume der Hohlkammerplatte eignen sich aber sehr gut zur Befüllung mit schüttfähigem Füllmaterial. So lassen sich zum Beispiel poröse Granulate wie Aerogele verwenden (Bild 2.11), die zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften und der Lichtstreuung beitragen. Die Stege verhindern unregelmäßige Setzungen des Aerogels, die in der Vergangenheit bei befüllten Isolierglas-scheiben aufgetreten sein sollen.⁷ Grundsätzlich lassen sich im Hohlraum auch neuartige Medien zur Energiespeicherung anordnen. In einem Senioren-Wohnheim in Domat/Ems (Bild 2.12) wurde eine mehrschichtige Glasfassade auf der Innenseite mit 24 mm dicken Hohlkammerplatten aus Polycarbonat ausgestattet, in denen PCM-Elemente⁸ implementiert wurden. Ein Salzhydrat ist als latenter Wärmespeicher in den Hohlkammern der Stegplatte eingeschlossen, das durch Absorption der Sonnenenergie schmilzt und dabei Energie aufnimmt. Beim Abkühlen gibt das Medium die Wärme zeitversetzt durch die Deckschicht an den Innenraum wieder ab. Die Stegplatte eignet sich sehr gut als Trägerplatte für diese Art von Speichermedien.

Wie in Kapitel 1.3 kurz aufgezeigt lässt sich der sichtbare Hohlraum auch zu reinen Gestaltungszwecken befüllen, um die Licht- und Blickdurchlässigkeit zu beeinflussen. Hohlkammerplatten werden in geringen Dicken unter 10 mm häufig im Möbelbau als aussteifende Schrankrückwände oder Raumabtrennungen verwendet.

Für Verkleidungen im Außenbereich, zum Beispiel für Vordächer oder kleine Gewächshäuser kommen Stegplatten aus PMMA oder Polycarbonat mit 16 mm Dicke und Stegabständen von 32 bis 64 mm vor.

Hohlkammerplatten sind in Stegrichtung kalt verformbar. Durch einsinnige Krümmung lassen sich zum Beispiel tonnenförmige Oberlichter oder Überdachungen verkleiden. Räumlich gekrümmte Oberflächen sind aufgrund der gerichteten Kernstruktur nicht möglich.

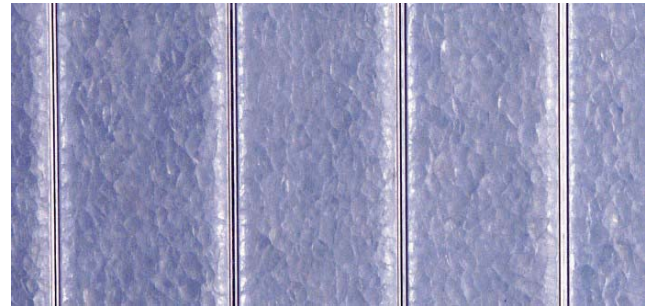


Bild 2.11: Verfüllung einer Hohlkammerplatte mit Aerogel zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften

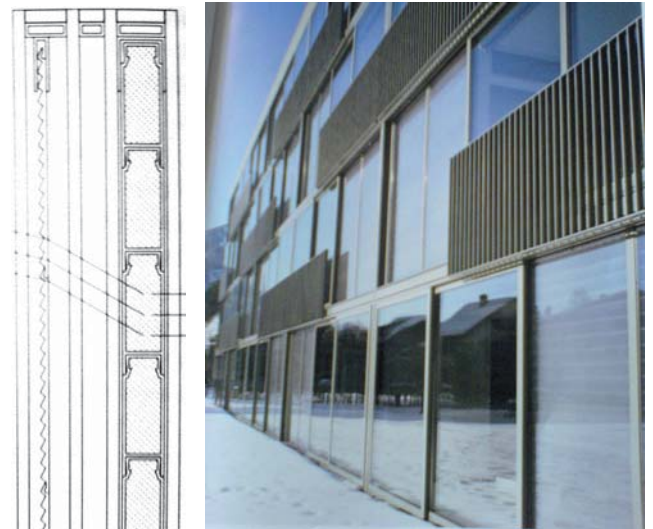


Bild 2.12: Fassade des Senioren-Wohnheims Domat/Ems (Architekt Dietrich Schwarz): Die horizontal orientierten Hohlkammern der Polycarbonat-Stegplatte sind mit latenten Wärmespeichern (PCM) gefüllt und verbessern die energetische Funktion der Fassade. Durch die Verfüllung der Hohlkammern ist die Fassade in diesen Bereichen blickdicht.

7 [det1202] S.1612

8 PCM = Phase Change Materials

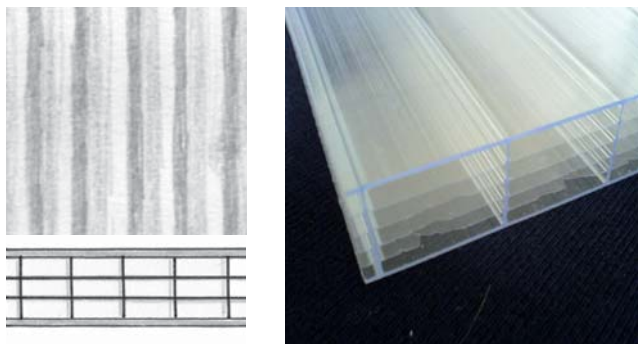


Bild 2.13: Mehrfachstegplatte; links: Mikrostuktur in Ansicht und Querschnitt, rechts: Plexiglas xxx (Fa. Röhm) aus Acrylglas mit fünf Kammern (vier Parallellagen) und einem Stegabstand 32mm

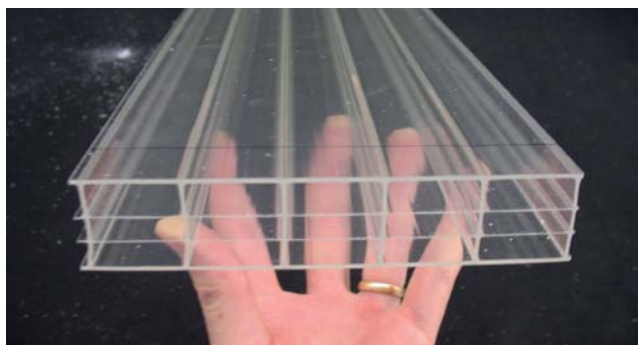


Bild 2.14: Mehrfachstegplatte aus transparentem PMMA mit zwei innenliegenden Parallellagen (Plexiglas S4P-32 von Röhm)



Bild 2.15: Charakteristisches Stegbeulen einer Mehrfachstegplatte aus PMMA (Bild aus einer Produktbroschüre der Firma Röhm): Ursachen sind Fertigungstoleranzen oder die aus der jeweiligen Einbausituation resultierenden thermisch bedingten Verformungen der thermoplastischen Deckschichten.

- Mehrfachstegplatte

Mehrfachstegplatten unterscheiden sich gegenüber den Hohlkammerplatten durch die Anordnung zusätzlicher deckschichtparalleler Lagen in der Kernschicht. Diese Lagen unterteilen die Luftkammern und führen zu einer weiteren Schichtung quer zur Fläche. Die Lichttransmission nimmt ab, analog dazu die Blickdurchlässigkeit (Bild 2.13).

Dieser Plattentyp wird vor allem für Fassaden sowie für Verkleidungen im Außenbereich verwendet. Es sind größere Plattendicken von 16 mm bis zu 40 mm verfügbar.

Die zusätzlichen Lagen im Bereich der Kernschicht spannen jeweils von Steg zu Steg und besitzen meist sehr geringe Wandungsstärken von ca. 0,5 mm, ähnlich wie bei einer Folie. Die Wandungsdicken der Stege und Deckschichten liegen bei Verwendung von PMMA bei 1-2 mm und bei Polycarbonat bei 0,5 - 1 mm. Der resultierende Gewichtszuwachs durch Anordnung paralleler Lagen hält sich in Grenzen und beträgt zum Beispiel bei einer Platte mit 40 mm Dicke und zwei Innenlagen (siehe Bild 2.14) etwa 15-20%.

Die statisch-konstruktiven Eigenschaften sind gegenüber den Hohlkammerplatten günstiger einzuschätzen. Die größeren Plattendicken erhöhen grundsätzlich die Gesamtsteifigkeit. Die parallelen Lagen koppeln die beulgefährdeten Stege und verbessern das Stabilitätsverhalten. Das Beulen der hohen Stege kann jedoch nicht vollständig vermieden werden, wie Bild 2.15 zeigt. Teilweise treten entsprechende Effekte bereits durch die Fertigung auf. Dies erklärt auch, weshalb die Fertigungstoleranzen bei extrudierten Stegplatten vergleichsweise hoch sind. Der Effekt kann sich noch verstärken, zum Beispiel in der Gebäudehülle: Die Deckschichten der Außen- und Innenseite werden aufgrund des Temperaturgefälles unterschiedlich thermisch verformt. Die resultierende Verschiebung zueinander kann einen weiteren Beuleffekt bewirken.

Je nach Anzahl der parallel angeordneten Lagen einschließlich der Deckschichtlagen bezeichnet man alle Parallelstegplatten als Doppel-, Dreifach-, Vierfachstegplatten usw.

Das Wärmedämmverhalten verbessert sich aufgrund der erhöhten Anzahl von Hohlkammern. Die Konvektion in den Zwischenräumen reduziert sich und ermöglicht Wär-

medurchgangszahlen bis zu $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei einer 40 mm Sechsfachstegplatte aus Polycarbonat.

Die Implementierung von Füllstoffen in der Kernschicht ist gegenüber den Hohlkammerplatten eingeschränkt, da durch die weitere Unterteilung der Luftkammer die Füllquerschnitte nicht mehr groß genug sind.

Die Umformbarkeit in Stegrichtung wird mit zunehmender Plattendicke und den parallelen Lagen in der Kernschicht schwieriger, da die Längendifferenzen zwischen Außen- und Innendeckschicht durch plastische Stauchung und Dehnung des Werkstoffs nicht mehr auszugleichen sind. Die Längsränder werden von einigen Herstellern mit integrierter Nut- und Feder-Fügetechnik ausgestattet (Bild 2.30). Die Profilierung des Randes wird bereits beim Extrusionsprozess vorgenommen. Dazu wird die Fließkanalgeometrie des Werkzeugs entsprechend ergänzt. Grundlegende Fügeprinzipien zeigt Bild 2.17.

2.2.2.2 Hybridstegplatten

Hybridstegplatten verfügen im Unterschied zu Parallelstegplatten über Stege, die sowohl vertikal als auch schräg in der Kernschicht angeordnet sind. Es entstehen fachwerkartige Querschnittsgeometrien.

- Rautenstegplatte

Bei der Rautenstegplatte sind die Stege schräg, oft im 45° -Winkel zu den Deckschichten orientiert. Die Stege schneiden sich gegenseitig mehrere Male und bilden im Schnittprofil eine Art Gitter. Das Querschnittsprofil ist wesentlich feiner, die Stege stabilisieren sich gegenseitig und die Kontaktabstände zwischen Deckschicht und Stegen fallen sehr viel enger aus. Durch die Ausbildung von fachwerkartigen Dreiecken wird die Platte in Querrichtung wesentlich steifer. Die geringeren Abstände der Schichtkomponenten untereinander reduzieren die Beul- und Knittergefahr und ermöglichen geringere Wandungsdicken von ca. 1 mm. Die meisten Produkte werden aus Polycarbonat hergestellt, um für das dichtere Gefüge geringere Schichtdicken ausbilden zu können. Wie Bild 2.19 zeigt, wirkt das flächige Erscheinungsbild feiner, die sich abzeichnenden Linien in der Fläche sind enger gestaffelt, wirken aber weniger kontrastreich als bei Parallelstegplatten.

Das Wärmedämmvermögen ist mit dem von Mehrfachstegplatten vergleichbar, da die Kernschicht in kleinfor-

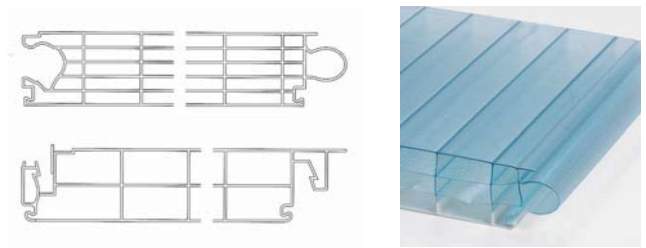


Bild 2.16: Mehrfachstegplatten mit integrierter Nut- und Federverbindung in Längsrichtung (Fa. Rodeca)

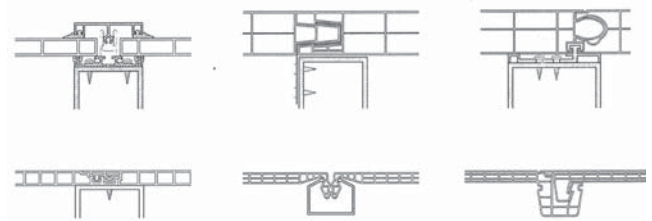


Bild 2.17: Gängige Fügeprinzipien von Stegplatten:

- Klemmverbindung mit externer Klemmleiste (oben links)
- Integrierte Nut- und Federverbindung mit Anker (oben rechts)
- Integrierte Nut- und Feder mit Versteifungsrippe (unten links)
- Integriertes Stecksystem mit externer Versteifungsrippe (u.l.)

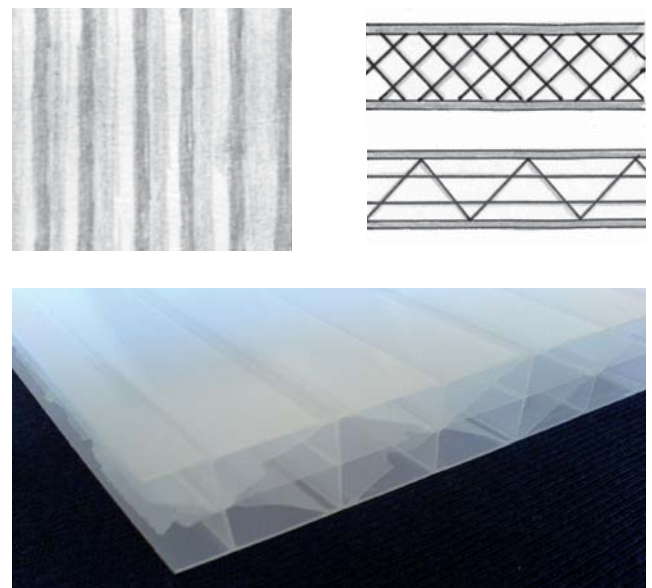


Bild 2.18: Hybridstegplatten; links: Mikrostuktur in Ansicht, rechts oben Querschnitt von Rauten- und Multistegplatte, unten: Makrolon 3-X32 mit Diagonalstegen und Mittellage mit X-Struktur (Bayersheuteurope)

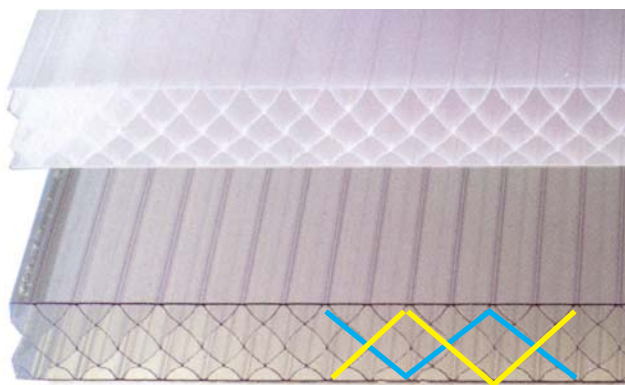


Bild 2.19: Rautenstegplatten aus Polycarbonat mit einer Dicke von 32 mm in unterschiedlicher Farbgebung bzw. Oberflächenbeschichtung (Fa. BayerSheetEurope)

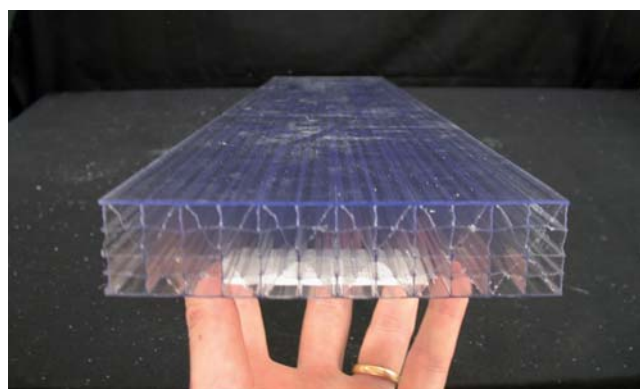


Bild 2.20: 32 mm dicke Multistegplatte aus Polycarbonat: Die Kernschicht besteht aus 3 Parallellagen, X-förmig angeordneten Diagonalstege und vertikalen Stegen in halbem Rasterabstand (Makrolon 5X-32/32, Fa. BayerSheetEurope)

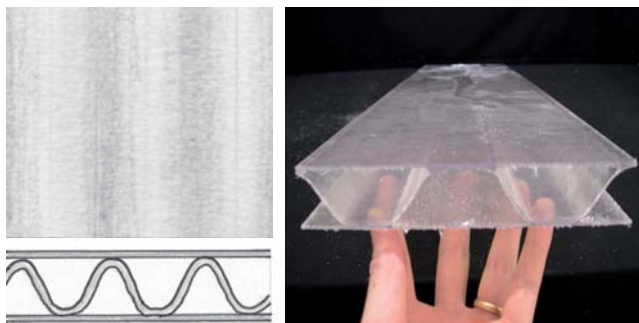


Bild 2.21: Wellenstegplatte, links: Mikrostuktur in Ansicht und Querschnitt, rechts: Wellenstegplatte aus GFK, Kern mit Deckschichten verklebt, ohne Füllung 30mm Dicke (Lichtelement, Fa. Scobalit)

matigere Luftkammern aufgelöst ist. Maximale Wärmedurchgangskoeffizienten liegen bei ca. $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei einer 32 mm dicken Platte.

Rautenstegplatten sind für eine Kaltbiegung nicht geeignet, da die diagonalen Stege den Kaltbiegeradius einschränken. Die Ausstattung der Platte mit integrierter Füge-technik analog zu den Parallelstegplatten ist ebenfalls im Extrusionsprozess möglich.

- Multistegplatte

Die Multistegplatte steht begrifflich für alle weiteren aus Thermoplasten extrudierbaren Querschnittsgeometrien, die aus der Kombination der genannten Plattentypen im herstellbar sind. Häufig werden Mehrfachstegplatten mit Diagonalstege ausgekreuzt, um die Steifigkeit in Querrichtung zu erhöhen und die Beulgefahr der Stege weiter zu reduzieren. Hersteller bezeichnen ihre Platten in geometrischer Analogie zu Buchstaben wie X-, M-, K- oder Y-Struktur.

Die Überlagerung mit Profilen von Parallelstegplatten reduziert die Hohlkammerquerschnitte weiter und bewirkt eine Verbesserung des Wärmedurchgangs auf ca. $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ für eine 32 mm dicke Platte. Verschiedene Querschnittsgeometrien gängiger Produkte zeigt Bild 2.20.

2.2.2.3 Wellenstegplatten

Wellenstegplatten unterscheiden sich geometrisch und fertigungstechnisch von den in den beiden vorherigen Kapiteln gezeigten Plattentypen. Unter diesen Begriff fallen alle transluzenten Sandwichstrukturen, deren Stege nicht geradlinig zwischen den beiden Deckschichten verlaufen und durch ihre multiplizierte Anordnung für einen homogenen Verbund sorgen, sondern ein durchgängiges Profil darstellen, dass aus einem Element besteht. Die geometrische Situation des Verbundes zwischen Steg und Deckschicht gestaltet sich grundlegend anders. Der Steg „mäandriert“ zwischen den Deckschichten als wellenförmiges oder auch trapezförmiges Profil und lagert sich flächig an die Deckschicht an. Der Kontakt erfolgt also nicht kantenförmig wie bei den zuvor gezeigten Stegplatten, sondern partiell flächig, wie die blauen Markierungen in Bild 2.22 zeigen.

Extrudierte Produkte aus Thermoplasten, die dieser Querschnittsgeometrie entsprechen, wurden im Rahmen der Produktrecherche nicht gefunden. Da bei extrudierten Stegplatten alle Stege geradlinig verlaufen, erscheint die

Umsetzung gekrümmter Stege durch das Extrusionsverfahren kompliziert. Hinzu kommt, dass die Abstände der Stege untereinander recht groß würden und folglich die Beul- und Knittergefährdung thermoplastischer Systeme recht problematisch wäre. Recherchierte Produkte, die diesem Prinzip folgen, bestehen in der Regel aus glasfaserverstärkten Kunststoffen, die über eine etwa dreimal höhere Materialsteifigkeit gegenüber PMMA oder PC verfügt. Bei dem Produkt „ILE“ des Schweizer Anbieters „Scobalit“ wird die Kernschicht durch eine Wellplatte gebildet, die im Wechsel die Deckschichten berührt und in diesen Bereichen schubsteif verklebt ist. Der 30-50 mm dicke Sandwichverbund besteht aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit einem Faseranteil von 30% und einer Harzmatrix aus transluzentem Polyester. Das spezifische Gewicht des GFK ist mit 1800 kg/m^3 etwa um 50% höher als das von PMMA und PC und hängt zudem vom Glasfaseranteil ab. Die Wandungsdicken der drei Lagen betragen jeweils ca. 2 mm, das Flächengewicht beträgt folglich etwa das doppelte gegenüber extrudierten Stegplatten gleicher Stärke.

Die Lichtdurchlässigkeit ist wesentlich geringer. Das Gefüge ist weitgehend blickdicht und streut das Licht sehr diffus. Da die Plattengrößen nicht durch den Aktionsraum einer Maschine beschränkt sind, lassen sich Einzelelemente mit größeren Abmessungen herstellen. Die maximal angegebenen Liefergrößen liegen bei $8000 \times 2400 \text{ mm}$. Die additive Fügung der Schichtkomponenten und die Fertigung auf Maß ist mit einem größeren fertigungstechnischen Aufwand verbunden. Dies bewirkt einen höheren Einheitspreis gegenüber extrudierten Stegplatten.

Die großen Kontaktflächen und die höhere Materialsteifigkeit von GFK lassen vermuten, dass die Platten grundsätzlich über bessere statisch-konstruktive Eigenschaften als die thermoplastischen Stegplatten aus PMMA und PC verfügen. In den Bereichen, wo der Wellsteg die Deckschicht berührt, verdoppelt sich die Wandungsdicke und bewirkt im Erscheinungsbild einen dezenten Wechsel von hellen und dunklen Streifen mit weichen Übergängen (Bild 2.22). In den Ablösebereichen von Wellsteg und Deckschicht ist die Harzmatrix ausgerundet, was Kerbspannungen vermeidet.

Wellenstegplatten aus GFK werden vornehmlich im Fassadenbereich eingesetzt. Zur Erhöhung der Witterungsbeständigkeit werden auf den Deckschichtaußenseiten Gel-Coat-Beschichtungen aufgebracht, um ein Vergilben und das Freilegen von Fasern zu verhindern. Die großen Zwi-



Bild 2.22: Wellenstegplatte „ILE“ aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit „Nanogel“-Füllung (Fa. Scobalit). Die blauen Markierungen zeigen die für die schubsteife Verklebung zur Verfügung stehenden Kontaktflächen.

schenräume eignen sich gut zur Verfüllung mit Dämmstoffen zur Optimierung des Wärmedämmverhaltens. Die Lichtdurchlässigkeit wird jedoch weiter reduziert. „Scolalit“ bietet die Wellenstegplatte als „Lichtelement“ mit einer Aerogel-Verfüllung an (vgl. Seite 28). Nach Angaben des Herstellers ergibt sich dadurch eine Reduzierung des Wärmedurchgangs von ca. $2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ des ungefüllten Elements auf $0,41 \text{ W/m}^2\text{K}$ für das gefüllte Element bei einer Gesamtdicke von 50 mm. Dies entspricht in etwa der Anforderung der ENEC 2007 an den Mindestwärmeschutz von opaken Außenwänden. Bei der genannten Konfiguration gibt der Hersteller einen Energiedurchlaßgrad g von 0,26 an. Anhand der gezeigten technischen Werte lässt sich das beschriebene Sandwichsystem eher als lichtdurchlässige Wand denn als lichtstreuende Verglasungsalternative bezeichnen. Sandwichelemente aus GFK sind brandschutztechnisch als B2-Baustoffe „brennbar“ klassifiziert. Durch spezielle Harzmischungen oder das Einbringen von Flammenschutzmitteln sind auch Klassifizierungen in B1 „schwer entflammbar“ möglich. GFK als Verbundwerkstoff ist im Werkstoffkreislauf nicht wiederverwendbar.

2.2.3 Wabenplatten

Wabenplatten bestehen aus ebenenparallelen Deckschichten, die mit einem dazwischenliegenden Kern aus baugleichen Waben verbunden sind. Bild 2.24 zeigt stellvertretend die drei Schichtkomponenten einer Tubuswabenplatte, die additiv durch eine Klebefuge miteinander verbunden sind. Dieses Gefügeprinzip entspricht der klassischen Sandwichbauweise.

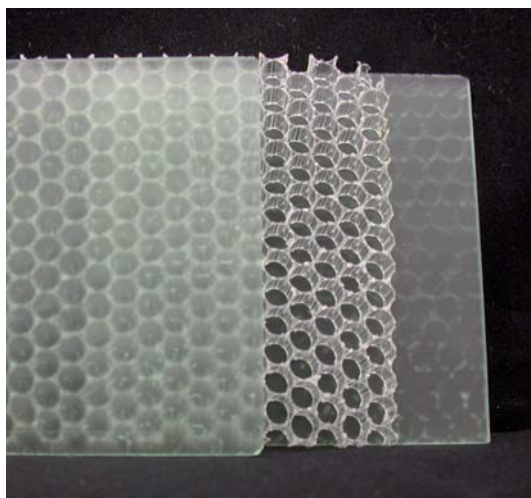


Bild 2.24: Additiver Sandwichverbund der Wabenplatte

Die kleinste Zelleinheit dieser Art von Sandwichstruktur ist die Wabe. Dessen geometrische Struktur und Anordnung zueinander führt zur typologischen Unterscheidung von Platten mit prismatischen Wabenkern sowie Platten mit räumlich strukturierten Wabenkern. Alle Plattentypen haben gemeinsam, dass die Waben für sich abgeschlossene Einheiten bilden. Die kompaktierende Aneinanderreihung dieser Einheiten führt zu einer Stabilisierung der Waben untereinander und erzeugt engmaschige, ungerichtete Anschlussgeometrien an den Kernober- und unterseiten zur schubfesten Verklebung oder Verschweißung mit den Deckschichten. Durch den additiven Charakter der Struktur sind die Fertigungstoleranzen im Vergleich zu extrudierten Stegplatten wesentlich kleiner. Die transluzente Kernschicht

wird ausschließlich aus thermoplastischen Kunststoffen hergestellt, da sich diese durch thermische Umformung in die gewünschte Geometrie bringen lassen. Durch deren geringes spezifisches Gewicht und die Möglichkeit, sehr dünne Wandstärken auszubilden, ergeben sich die für Sandwichkerne charakteristischen Gewichtsvorteile.

Aufgrund des additiven Herstellvorganges lässt sich die Deckschicht in Material und Dicke frei wählen. In Verbindung mit unterschiedlichen transluzenten Kerngeometrien ergibt sich vordergründig eine breite Palette an gestalterischen Kombinationsmöglichkeiten (siehe Bild 2.25), die diese Art von Sandwichstrukturen bisher besonders attraktiv für Anwendungen im Interior- und Messebaubereich gemacht haben. Während der Produktrecherche wurde auch deutlich, dass die Hersteller ihre Marketingstrategie besonders auf dieses Marktsegment konzentrieren und ihre Produktpaletten primär auf Gestaltungsaspekte hin ausrichten.

Wesentlichen Einfluss, gerade in Hinblick auf statisch-konstruktive Eigenschaften und die Langzeitbeständigkeit, hat die Ausbildung der horizontalen Schichtfuge. Je nach Materialkombination werden geeignete Fügesysteme verwendet. In der Regel kommen Klebstoffe zum Einsatz, die nach Aushärtung transparent sind. Deckschichten und Wabenkern werden meist unter Wärme und Druck mit entsprechenden Klebesystemen flächig in einer Art Laminierungsvorgang zu Sandwichstrukturen verarbeitet. Die maximalen Plattenabmessungen hängen dabei entweder von der Größe der „Laminier“-Anlagen oder von den Liefergrößen der einzelnen Schichtkomponenten ab. Alle recherchierten Hersteller stellen die Kernschicht selbst her und sorgen für den flächigen Verbund der Schichtkomponenten. Die Deckschichten werden meist als Halbzeuge eingekauft und weiterverarbeitet.

Die Importanz der Schichtfugenausbildung spielt teilweise auch eine Rolle in den Marketingstrategien der Produktanbieter. Die jeweilige Verbundtechnologie wird in den Produktprospekten besonders betont, jedoch nicht weiter spezifiziert („ein spezielles Klebeverfahren...“). Während der Marktrecherche fiel auch auf, dass die ursprünglichen Kernkompetenzen der Hersteller von Wabenplatten vor allem im Bereich der Klebe- und Verbundtechnologien angesiedelt sind. Dies belegt auch die Tatsache, dass keiner der Produktanbieter gleichzeitig Stegplatten herstellt, was auch umgekehrt zutrifft. So besteht zum Beispiel das traditionelle Kerngeschäft des österreichischen Herstel-



Bild 2.25: Wabenplatte - Beispiele für Kombinationsmöglichkeiten unter Gestaltungsaspekten: oben Tubuswabenplatte mit farbigen PMMA-Deckschichten, unten mamorierter Wabenkern mit transparenten Polycarbonat-Deckschichten (Produkt „Airboard“ von Design Composite)



Bild 2.26: Anwendungen von Wabenplatten im Messebau- und Interiorbereich: Trennwand in einem Shop der Vitra GmbH (oben), Messestand der Firma Gemeco (unten)

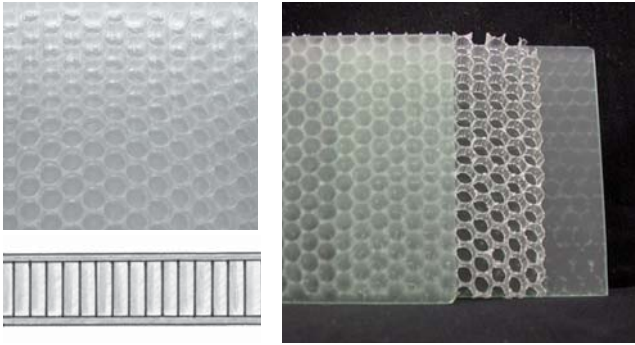


Bild 2.27: Tubuswabenplatte, links: Mikrostuktur in Ansicht und Querschnitt, rechts: Schichtenaufbau (AirBoard von Design Composite)

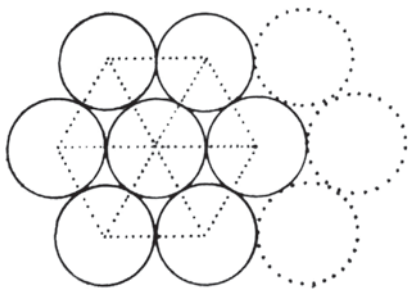


Bild 2.28: Geometrisches Prinzip der Tubuswabe: Hexagonale Packung sorgt für Stabilität und ermöglicht geringe Wandungsdicken



Bild 2.29: Gegenseitige Verformung einer Tubuswabe-Kernschicht und skizzenhafte Analyse dieses Verformungsverhaltens anhand einer Zylinderwabe

lers „Blizzard“ in der Produktion von Wintersportartikeln wie Skiern oder Snowboards. Das „Know-how“ des Klebens aus der Skiproduktion war nach Angaben der Geschäftsführung⁹ vor wenigen Jahren Initiator für die Entwicklung neuartiger Sandwichprodukte mit polymeren Wabenkern. Mittlerweile wurde das Geschäftsfeld unter einem neuen Namen ausgelagert.

2.2.3.1 Prismatische Wabenplatten

Prismatische Waben verfügen über eine Profiltreue quer zur Platte in Z-Richtung. Die Kernschicht wird durch die Mantelflächen der Prismen gebildet, welche orthogonal zu den Deckschichten orientiert sind. Als Prismengrundfläche kommen theoretisch alle denkbaren stereometrischen Grundgeometrien wie Kreis, Dreieck, Viereck usw. in Betracht. Aus fertigungstechnischen und strukturbedingten Gründen bestehen die Waben aber entweder aus Kreiszylindern, polygonalen Prismen oder gefalteten Stegen. Aus der kompakten Anordnung der einzelnen Prismenwaben entsteht ein flächiger Wabenkern.

- Tubuswabe

Das Grundelement der Kernschicht ist ein Kreiszylinder. Die Herstellung mehrerer zusammenhängender Elemente wird durch Extrusion eines thermoplastischen Kunststoffes erzeugt. Die Wandungsdicke der Mantelfläche entspricht denen von Folien und beträgt 0,1-0,5 mm. Zur Erzielung dieser geringen Wandungsdicken werden überwiegend Polycarbonat, PET oder PP verwendet. Das spezifische Gewicht von Wabenkernen ist daher ausgesprochen gering (Bild 2.27).

Die dichteste Anordnung von Kreiszylindern zeigt Bild 2.28. Jede Zylinderwabe ist an sechs Punkten durch benachbarte Zylinderwaben gehalten und gegen Beulen stabilisiert. Jeweils drei Zylinderwaben erzeugen einen kleinen dreiecksförmigen Hohlraum. Eine interessante Eigenschaft dieses Kerntyps stellt die Verformbarkeit dar. Wölbt man die Wabenstruktur an den Seiten nach oben wie in Bild 2.29 gezeigt, wölbt sich die Kernfläche im rechten Winkel dazu nach unten. Dies ist auf die geometriebedingte, kombinierte Zwangsverformung der Zylinderwaben an Ober- und Unterseite zurückzuführen. Die Wölbung nach oben staucht den Kreiszylinder an der Oberseite zu einer Ellipse, dessen größerer Radius ortho-

gonal zur Wölbrichtung orientiert ist. Dies bewirkt eine Stauchung der Zylinderunterseite quer zur oberen Wölbrichtung. Benachbarte Zylinderunterseiten ziehen sich zusammen und verkürzen die Unterseite. Die Unterseite wölbt sich nach unten. In Produkten wurde diese Verformungseigenschaft nach eigener Recherche noch nicht zur Anwendung gebracht.

Kerne aus Zylinderwaben verfügen über eine ungerichtete Gesamtstruktur. Die hexagonale Packung und der Wabendurchmesser von ca. 6-8 mm schaffen eine homogene, dichte und gleichmäßige Kontaktfläche zu den Deckschichtinnenseiten. Da die Wabenwandungen sehr dünn sind, verbleibt jedoch nur wenig kongruente Querschnittsfläche, die zur Verklebung herangezogen werden kann. Untersucht man die Klebezone, so fällt auf, dass für die schubfeste Verklebung intumeszierende Klebstoffe verwendet werden. Die Intumeszenz bewirkt die Ausbildung einer kehlhaftförmigen Klebung. Die Klebstoffe nutzen den Kapillareffekt, um eine größere Klebefläche auszubilden¹⁰ (Bild 2.30). Um eine Dauerhaftigkeit vor allem im Außenbereich zu gewährleisten, sollten die Klebefugen vor UV-Strahlung geschützt werden. Die äußeren Deckschichten lassen sich gegebenenfalls mit einer entsprechenden Beschichtung ausstatten.

Als Deckschichtmaterialien können alle transparenten Werkstoffe wie PMMA, PC, GFK oder Glas verwendet werden. Marktgängige Produkte wie zum Beispiel „AirBoard“ der Firma DesignComposite¹¹ verwenden transparentes PMMA und PC in verschiedenen Dicken zwischen 0,5 bis 2 mm. Durch die Wahl unterschiedlicher Deck- und Kernmaterialien ergibt sich eine große Zahl an Plattenkonfigurationen in unterschiedlichen Dicken, Farbigkeiten und Oberflächenstrukturen.

Die gezeigte Kernstruktur kann nach verschiedenen Herstellerangaben bis zu einer Höhe von 100 mm hergestellt werden, die Abmessungen sind begrenzt auf ca. 3 x 2 Meter. Serienmässig werden Wabenplatten bisher mit einer Gesamtdicke von 19 bis 40 mm angeboten.

Die Ausbildung abgeschlossener, dicht gestaffelter Luftzellen in der Wabenstruktur führt zu vergleichsweise guten Wärmedämmeigenschaften mit U-Werten von 2,2 W/m²K für eine 19 mm dicke Wabenplatte bis zu 1,3 W/m²K für eine 40 mm dicke Wabenplatte der genannten

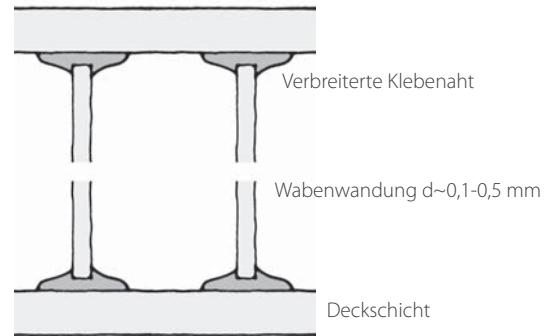


Bild 2.30: Prinzip der Schichtfugenausbildung Kern-Deckschicht mit intumeszierenden Klebstoffen: Schaffung einer breiteren Klebefläche bei dünnwandigen Waben

¹⁰ [hab05] S.652

¹¹ [des07]

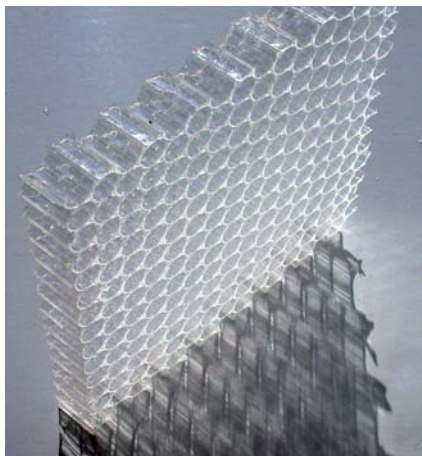


Bild 2.31: Versuche zur Lichtstreuung und zum Schattenspiel eines Tubuswabenkerns aus Polycarbonat



Bild 2.32: Blickdurchlässigkeit einer Tubuswabenplatte: Facettierungseffekt des dahinter liegenden Raumes (Füllung einer Tür)



Bild 2.33: Wabenplatten mit farbigen Deckschichten aus PMMA werden häufig im Innenausbau und Möbelbau verwendet.

Konfiguration. In die Zellen eingedrungene Feuchtigkeit lässt sich jedoch nur schwer wieder entfernen. Diese kann über zwei Wege in die Wabenzelle eindringen: je nach Diffusionsverhalten über die Deckschichten (z.B. hat PC eine wenn auch geringe Wasseraufnahme) oder seitlich durch Risse in der Klebefuge zwischen Deckschicht und Kern. Aus diesem Grund sollte für Aussenanwendungen auf ausreichende Wasserdichtigkeit des Deckschichtmaterials geachtet werden. Gleichfalls ist die Dauerhaftigkeit der Klebefuge durch Abdichtung der offenen Stirnränder sowie durch entsprechenden UV-Schutz zu gewährleisten.

Nach Bild 2.04 entspricht die Lichtdurchlässigkeit in etwa den Werten von Mehrfachstegplatten. Das Licht wird jedoch aufgrund der kapillarartigen Kernstruktur stärker gestreut, wie Bild 2.31 zeigt. Dieser Effekt nimmt mit wachsender Kernschichtdicke und spitzem Lichteinfallswinkel deutlich zu. Schräg durchscheinendes Licht aktiviert eine Tiefenwirkung der gerichteten Zylinderwaben. Die Blickdurchlässigkeit hängt ebenfalls maßgeblich vom Blickwinkel ab. Bei orthogonalem Blickwinkel erzeugt die dünnwandige Wabenstruktur eine Facettierung des dahinter liegenden Blickfelds, welches bei entsprechender Entfernung des Betrachters von der Platte wieder zu einem Gesamtbild verschmilzt (Bild 2.32). Die Wabenstruktur wirkt so je nach Beschaffenheit der Deckschichten wie ein Filter. Die Wabenstruktur selbst ist aus weiterer Entfernung nicht mehr wirklich wahrnehmbar. Die genannten Merkmale machen das Material gerade für bauliche Anwendungen interessant, bei der es um die Inszenierung von oder mit Licht geht.

Die Implementierung von Füllmaterial wie zusätzliche Dämm- oder Speichermedien ist nicht möglich. Es liegt zum einen daran, dass die einzelnen Waben mit Durchmessern von 6-8 mm verhältnismäßig klein sind und eine gleichmäßige Verfüllung sehr arbeitsintensiv wäre. Außerdem müsste der Füllvorgang vor der Verklebung von Kern- und Deckschicht erfolgen, was fertigungstechnisch problematisch ist.

- Polygonalwabe

Polygonale Waben verfügen über weitere stereometrische Grundgeometrien wie zum Beispiel Dreiecke, Vierecke oder Polygone. Hersteller wie „Panelite“ oder „Wihag“ bieten Kernstrukturen aus hexagonalen Waben an, die geometrisch dem Packungsprinzip der Tubuswaben

entsprechen. Alle bei den Tubuswaben genannten grundlegenden Eigenschaften treffen daher auch auf Polygonalwaben zu. Die Fertigungstoleranzen sind jedoch größer, wie in Bild 2.34 gut zu erkennen ist

Die Firma „Wihag“ kombiniert zum Beispiel 0,7 mm dünne Deckschichten aus glasfaserverstärktem Polypropylen (PP, ein Thermoplast) mit einer hexagonalen Wabenstruktur aus PP durch Schmelzkaschierung in der Schichtfuge. Bei diesem System ist also kein Klebstoff zur Schubsteifen Fügung notwendig. Die Lichtdurchlässigkeit ist jedoch sehr stark eingeschränkt. Die herstellbaren Wabenhöhen variieren zwischen 15 und 100 mm, die Wärmedämmeigenschaften mit $2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei 30 mm Schichtdicke etwas geringer als bei Tubuswabenplatten aus Polycarbonat gleicher Dicke.

Der Hersteller „Panelite“ stellt Hexagonalwabenplatten mit eingefärbten GFK-Deckschichten mit Polyestermatrix her.

- Faltwabe

Faltwaben entstehen durch Anordnung gefalteter Streifen aus transparenten Thermoplasten wie Polycarbonat oder Polyethylentereftalat (PET). Die Wandungsdicke beträgt etwa 0,5-1 mm. Bild 2.36 zeigt das grundlegende Fertigungsprinzip: Die Streifen werden durch Umformen in eine mäandrierende Form gebracht und hintereinandergestellt. Durch punktwises Verschweißen der Streifen untereinander an den jeweiligen Kontaktstellen entsteht eine zusammenhängende Kernstruktur mit abgeschlossenen, prismenartigen Waben. Der Grundriss der Waben ähnelt dabei einem Rechteck und führt zu einer individuellen Optik.

Die Firmen „Hoppro/Wacotech“ produzieren nach diesem Prinzip thermoplastische Wabenkerne aus Polyacrylonitril (PAN) und Polyethylentereftalat (PET) und verkleben diese serienmäßig mit Deckschichten aus PMMA oder PET (Bild 2.35), andere Deckschichten sind gemäß Hersteller denkbar. Die Fertigungstoleranzen sind, wie die Ansicht in Bild 2.35 zeigt, größer. Anwendungsbereiche sind vornehmlich Innenräume wie im Messebau und Interior-Design. Die Kernstrukturen werden nach Herstellerangaben außerdem zur Verfüllung des Scheibenzwischenraums von Isolierverglasungen verwendet.

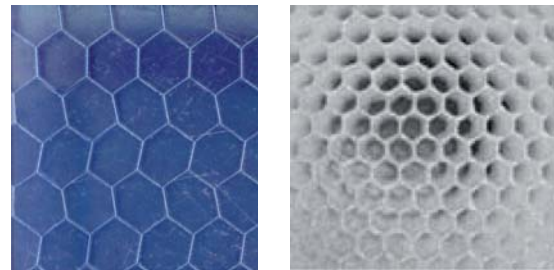


Bild 2.34: Polygonalwabenplatte

links: Hexagonale Wabenstruktur mit blau eingefärbten GFK-Deckschichten (Translucent Honeycomb Panel, Fa. Panelite)

rechts: Hexagonaler Wabenkern aus Polypropylen (Fa. Wihag)

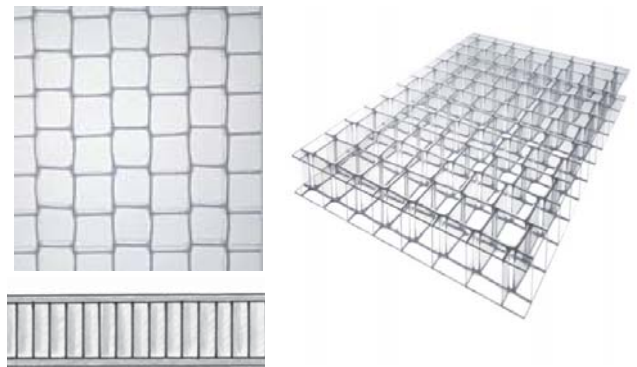


Bild 2.35: Platte mit Faltwaben

links: Mikrostuktur in Ansicht und Querschnitt, rechts: Viewpan 20 PET-PET mit Waben und Deckschichten aus Polyethylentereftalat (Fa. Wacotech)

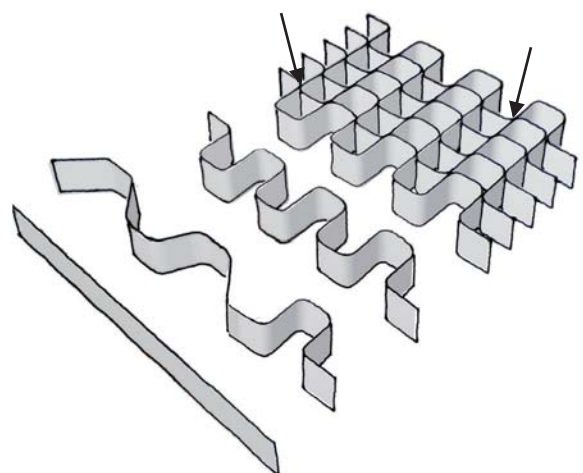


Bild 2.36: Fertigungsprinzip des Wabenkerns aus gefalteten Streifen: Thermisches Umformen von PET/PC-Streifen, punktwises Verschweißen an den Kontaktstellen der hintereinandergestellten Streifen (Pfeil)

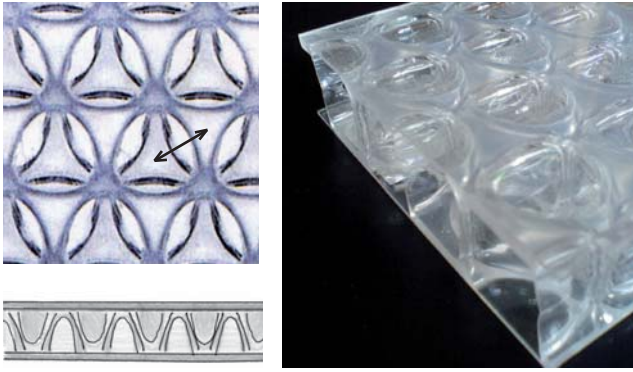


Bild 2.37: Platte mit räumlich strukturierten Wabenkern („3D-Wabe“)

links: Mikrostuktur in Ansicht und Querschnitt, rechts: Seitenansicht mit transluzenten Deckschichten aus PC
(Pfeil = Geometrischer Versatz der Kontur)

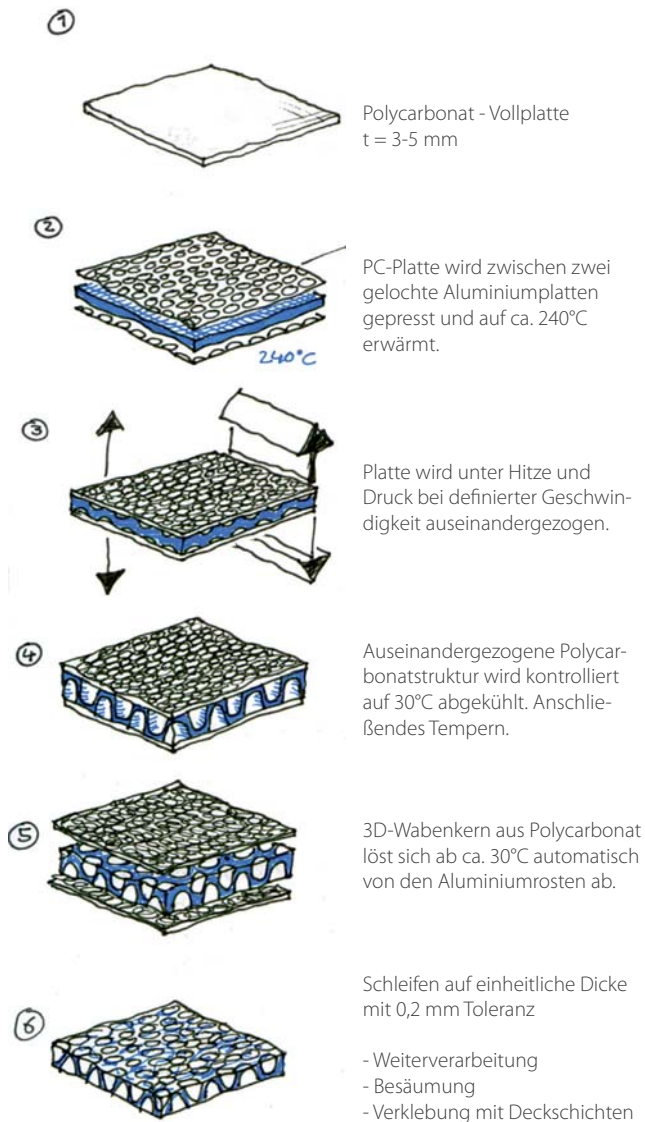


Bild 2.38: Fertigungsprinzip der räumlichen Wabenstruktur aus Polycarbonat, nach [bli04]

2.2.3.2 Platten mit strukturiertem Wabenkern

Der strukturierte Wabenkern funktioniert im Gegensatz zum prismatischen Wabenkern als stofflich zusammenhängende, räumlich gekrümmte Struktur („3D-Wabe“). Sie entsteht nicht durch Addition vieler kleiner gerichteter Grundelemente, sondern durch ganzheitliche thermische Formgebung einer Polycarbonat-Vollplatte. Wie Bild 2.37 zeigt, folgt die Wabenstruktur einem regelmäßigen Geometrieprinzip gleichseitiger Dreiecke. Die Wabenzelle entspricht im Grundriss in etwa einem Dreieck, die Mantelflächen der Waben sind jedoch räumlich gekrümmt, da die Seiten des oberseitigen Dreiecks konvex gekrümmt sind, die Seiten des unterseitigen Dreiecks hingegen konkav gekrümmt sind. Die trichterförmigen Einzelwaben haben daher eine leicht konische Form, dessen Winkel von der Kernhöhe abhängt. Die Waben sind jeweils nur zu einer Seite hin offen. Jede Wabe ist von drei weiteren Waben umgeben, deren Öffnungen jeweils zur anderen Seite orientiert sind. Der triangulierte Wechsel von Hoch- und Tiefpunkten erzeugt in der Mikrostruktur das charakteristische ornamentartige Muster (vgl. Kapitel 4.1).

- Herstellungsprinzip der räumlichen Wabenstruktur

Der Fertigungsprozess nutzt gezielt die guten Umformigenschaften thermoplastischer Kunststoffe unter Einsatz von Wärme und Druck. Das Herstellungsprinzip nimmt eine gewisse formale Analogie zu Sandwichkonstruktionen vorweg, das Formwerkzeug funktioniert wie eine Art „Sandwichtoaster“ (Bild 2.38): eine Vollplatte aus Polycarbonat wird zwischen zwei perforierten Aluminiumplatten angeordnet. Die Perforation der beiden Metallplatten besteht aus Löchern, die im Raster eines gleichseitigen Dreiecks angeordnet sind. Die untere Platte weist dabei einen Versatz (Pfeil in Bild 2.37) auf. Diese geometrische Verschiebung ist die Voraussetzung zur Erzeugung der beschriebenen kontinuierlichen Raumstruktur.

Die PC-Platte wird angepresst und auf Erweichungstemperatur gebracht. Danach wird sie mit geringer Geschwindigkeit kontrolliert auseinandergezogen. Die weiche Polycarbonatmasse bildet unter Einfluss von Wärme und Druck die charakteristische Form aus. Um Zwängungsspannungen zu vermeiden, wird die Temperatur sehr langsam zurückgefahren. Das Polycarbonat erkaltet und härtet aus. Bei etwa 30°C löst sich die Wabenstruktur von selbst von den Aluminiumplatten ab. Der beschriebene Vorgang ist relativ zeit- und energieaufwendig und hängt auch von der Kernhöhe ab. Die Wabenstrukturen

können nur elementweise hergestellt werden, eine „Endlosproduktion“ wie bei extrudierten Stegplatten ist nicht möglich. Die maximalen Abmessungen sind durch die Werkzeuggröße festgelegt und liegen bei ca. 1 x 2 Meter. Das Fertigungsprinzip ist nach Angaben des Herstellers Design Composite ursprünglich in den U.S.A. entwickelt worden und dort als Patent eingetragen.¹² Diese stellen die Wabenstruktur mit der Produktbezeichnung „TriCore“ her. Weitere Hersteller wie Bencore und Pyrasied bieten 3D-Wabenplatten gleichen Bautyps mit unterschiedlichen Deckschichtkonfigurationen aus PMMA und PC an.

- Prozess-Eigenschaftsbeziehungen

Diverse Parameter sind im Produktionsprozess einstellbar. Der Ziehprozess erlaubt stufenlose Kernhöhen aus der gleichen Ursprungsplatte bis etwa 150 mm bei konstantem Flächengewicht. Dies bedeutet jedoch, dass die Wandungsdicken mit wachsender Höhe abnehmen und eine natürliche Höhenbegrenzung gegeben ist. Gewichtsvergleiche haben ergeben, dass 3 mm dicke PC-Vollplatten für Kerne bis ca. 25 mm, 4 mm dicke Vollplatten für Kerne bis 40 mm und 5 mm dicke Platten bis 150 mm verwendet werden. Der durchschnittliche Wabendurchmesser liegt bei 20 mm. Andere Wabengrößen werden nicht produziert, die Gründe sind nicht bekannt. Wie Bild 2.41 zeigt, sind 3D-Wabenplatten im Vergleich zu Tubuswabenplatten bei Dicken unter 90 mm Dicke schwerer, darüberhinaus aber deutlich leichter. Einen besonderen Einfluss hat der Fertigungsprozess auf die Schichtdickenverteilung. Im Gegensatz zu prismatischen Waben sind die Wandungsdicken über die Kernhöhe nicht konstant, wie Bild 2.40 deutlich macht. Die thermische Umformung bewirkt eine Materialkonzentration im Bereich der Ober- und Unterseiten der Kernstruktur. Die geringsten Wandungsdicken befinden sich in Plattenmitte und liegen unter 0,5 mm.

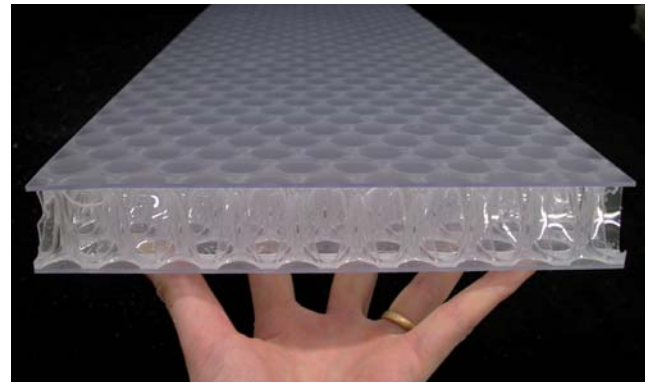


Bild 2.39: 40 mm dicke 3D-Wabenplatte mit aufgerauten Polycarbonat-deckschichten („clear pep stage“, Design Composite)

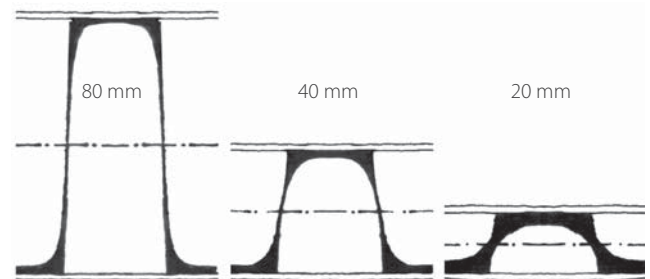
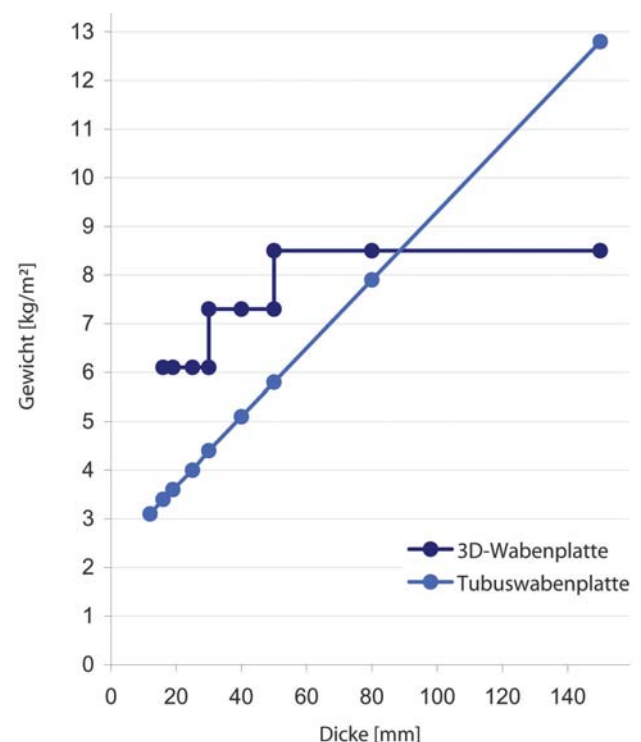


Bild 2.40: Kernschnitte durch verschieden hohe Wabenkerne zeigen prinzipiell die Varianz der Schichtdicken und die Konzentration von Material an den Ober- und Unterseiten der Kernschicht



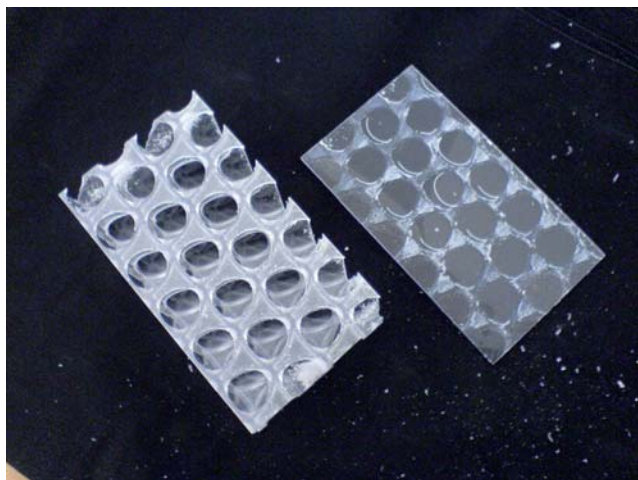


Bild 2.42: 36 mm Kernschicht und abgelöste Deckschicht aus 2 mm Polycarbonat: auf der Innenseite markieren Klebstoffreste die Kontaktflächenanteile der schubfesten Verklebung.

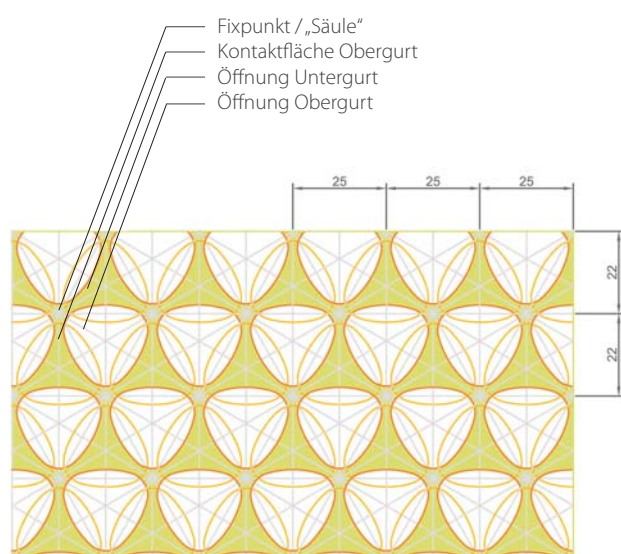


Bild 2.43: Aufsicht der triangulierten Wabenstruktur: zusammenhängende deckschichtparallele Kontaktfläche zur Verklebung (beige) mit Wabenöffnungen, dahinter die versetzten Öffnungen der Waben zur Gegenseite (gelbe Kontur)

- Schubsteifer Verbund mit Deckschichten

Ähnlich wie bei der Wellenstegplatte ergeben sich flächige Kontaktzonen zu den Deckschichten, die hier aber nicht streifenförmig, sondern zusammenhängend im Dreiecksraster angeordnet sind. Der Anteil deckungsgleicher Kontaktflächen zur schubsteifen Verbindung ist mit ca. 35% um ein vielfaches höher als bei prismatischen Wabenplatten (Bild 2.42), wo die dünnen Waben die Deckschichtinnenseiten rechtwinklig berühren und nur wenig effektive Anschlussfläche vorhanden ist. Die zur Verklebung nutzbare Kontaktfläche entspricht dabei der Fläche zwischen den Aluminiumplatten und der erzeugten Wabenstruktur während der Fertigung (Bild 2.43).

Als serienmäßige Deckschichten kommen PMMA und PC in unterschiedlichen Dicken und Farbigkeiten zur Anwendung. Die ebenen Kontaktflächen des Wabenkerns werden bei 60°C mit einem „Hotmelt“-Klebstoff auf Polyurethanbasis beschichtet und vorgetrocknet.¹³ Der beschichtete Wabenkern durchläuft eine Art Autoklave, in der eine Verwalzung mit den Deckschichten unter Wärme- einwirkung und Anpressdruck stattfindet. Der Klebstoff schmilzt kurzzeitig auf und härtet aus. Es können auch Sandwichelemente hergestellt werden, deren Abmessungen das Maximalmaß des herstellbaren Wabenkerns übersteigen. Hierzu werden die Kernelemente in der Fläche gestoßen. Die Ausbildung dieser Nahtstelle erfordert größte Genauigkeit, um einen einheitlichen Übergang der Struktur in der Fläche zu garantieren. Auf diese Weise werden Plattengrößen von ca. 2000 x 8000 mm möglich.

- Bauphysikalische und gestalterische Aspekte

Die Wabenzellen sind für sich abgeschlossen, haben aber größere Einzeldurchmesser als zum Beispiel Tubuswaben. Dies erklärt das etwas schlechtere Wärmedämmverhalten mit Werten gemäß Bild 2.04 von zum Beispiel 1,8 W/m²K für 40 mm dicke 3D-Wabenplatten mit 2 mm dicken Polycarbonatdeckschichten. Eine 80 mm dicke Platte kommt auf 1,1 W/m²K und ist folglich mit einer konventionellen gasgefüllten Wärmeschutzverglasung zu vergleichen. Der Energiedurchlaßgrad ist jedoch wesentlich geringer, er liegt für eine 19 mm dicke Platte bereits unter 60%.

Die transluzente Wabenstruktur zeigt eine differenzierte Lichttransmission. Diffuses Tageslicht wird durch mehrfache Spiegelungs- und Brechungseffekte in der transluzenten Kernschicht breit gestreut und macht die Platten in

großflächiger Anwendung zur blendfreien Ausleuchtung tiefer und hoher Räume attraktiv. Direktes Kunst- oder Sonnenlicht hingegen wird wie Bild 40 zeigt, mehrfach gebeugt und umgelenkt. Auf der lichtquellenabgewandten Seite entstehen regelmäßige Muster gebrochener und fokussierter Lichtanteile. Die Platte entfaltet bei direkter Durchleuchtung ihre Tiefenwirkung und strahlt wie eine Leuchtfläche.

Die Blickdurchlässigkeit nimmt mit zunehmender Kernstärke ab, die Kernstruktur ermöglicht aber schemenhafte Durchblicke, wie in Bild 2.45 erkennbar ist.

- Verwendung

Platten geringerer Dicke bis 20 mm finden bisher ähnlich wie prismatische Wabenplatten Anwendung im Messe- und Innenausbau sowie im Möbelbau. Platten größerer Dicke wie zum Beispiel das Produkt „clear pep stage“ mit 40 mm Plattendicke werden für selbsttragende Bodenkonstruktionen, zum Beispiel im Messestandbau verwendet. Die Wabenstruktur ist bei dieser Konfiguration mit aufgerauten Polycarbonatdeckschichten verklebt, die eine rutschfreie Begehbarkeit gewährleisten. Platten größerer Dicke bis 150 mm werden als raumtrennende Wände oder zunehmend auch in der Gebäudehülle verwendet. Die bei den Tubuswabenplatten erläuterte Problematik der Dichtigkeit für Anwendungen im Außenbereich trifft auf räumlich strukturierte Wabenplatten ebenso zu. Die Deckschichten sollten entsprechend wasserdicht, die flächige Klebefuge sowie die offenen Stirnseiten dauerhaft geschützt ausgebildet werden (vgl. Bild 2.46).

- Materialgerechte Fügeverfahren

Wie bei den prismatischen Wabenplatten bereits erwähnt, werden auch 3D-Wabenplatten bisher in den meisten Fällen wie konventionelle Plattenwerkstoffe aus Holz oder Gipskarton gefügt. Im Bereich der Gebäudehülle werden die Plattenränder wie Isolierglasscheiben mit Klemmleisten fixiert und abgedichtet. Auch die Verwendung von Punkthaltesystemen des konstruktiven Glasbaus für Vorhangfassaden wird in einem Werbeprospekt als geeignete Fügeverfahren angesprochen. Im Innenbereich erfolgt die Fixierung üblicherweise punktuell durch Holz- oder Blechschrauben mit Innengewinde, die in die Deckschichten einbinden oder auch einfach durchgeschraubt werden. Materialspezifischen Eigenheiten polymerer Werkstoffe wie thermische Ausdehnung oder elasto-plastisches Verhalten wird wenig entgegnet. Von einer materialspezi-

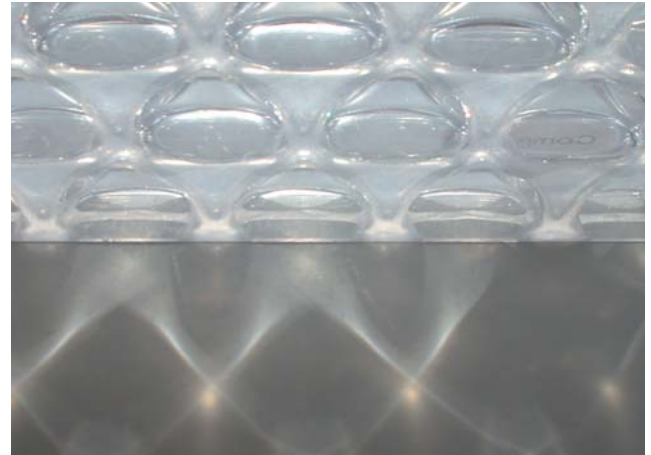


Bild 2.44: Lichtstudie einer 19 mm dicken 3D-Wabenplatte mit transparenten Polycarbonatdeckschichten: Das senkrecht einfallende Sonnenlicht wird auf der Innenseite in regelmäßigen Abständen gestreut und fokussiert.

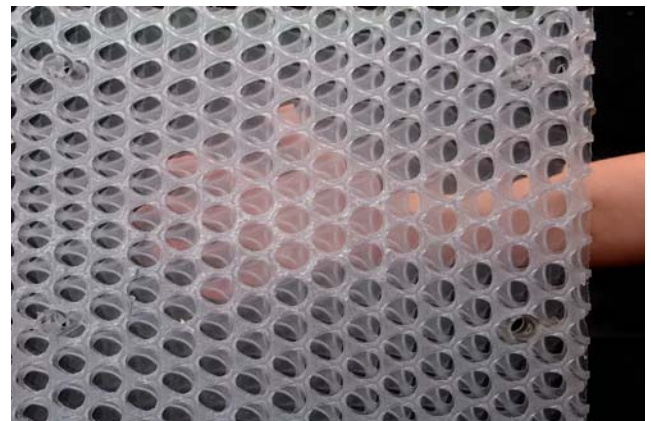


Bild 2.45: Blickdurchlässigkeit eines 36 mm dicken Wabenkerns aus Polycarbonat ohne Deckschichten



Bild 2.46: Brücke Pavilion 2002 in Brügge (Toyo Ito): Wabenplatten wurden hier als Bodenkonstruktion im Außenbereich angewendet (oben). Ungeschützte Stirnkanten führten zum Aufplatzen der Schichtfugen und Veralgen der Waben durch Schlagregen und Feuchtigkeit (unten, Bild von 2006).

fischen Fügechnik kann nicht die Rede sein. Integrierte Fügechniken, die die räumliche Tiefe der Kernschicht bewusst nutzen, sind nicht vorhanden bzw. bisher nicht entwickelt worden. In Kapitel 5 wird das Thema Fügechnik vertieft aufgegriffen.

Platten mit räumlich strukturiertem Wabenkern entsprechen aufgrund ihres Aufbaus am ehesten der in Kapitel 1.1 vorgestellten Sandwichbauweise.

2.3 Bisherige Verwendung in der Architektur

2.3.1 Projektrecherche

Zur Untersuchung der bisherigen Verwendung transluzenter Sandwichstrukturen in der Architektur wurden ca. 35 realisierte Projekte der letzten 10 Jahre recherchiert und analysiert (Bild 2.47).

Der tabellarische Überblick weist auf den Hauptanwendungsbereich Gebäudehülle hin. Dabei fiel auf, dass die meisten Projekte hallenartige Gewerbe- oder Sportbauten sind, bei denen vor allem Stegplattenmaterialien in großflächiger Anwendung zum Einsatz kommen. Aber auch bei Wohngebäuden werden transluzente Sandwichstrukturen in der Fassade mittlerweile vereinzelt verwendet. In der Folge werden 7 ausgewählte Projekte exemplarisch vorgestellt, die das momentan vorhandene Anwendungsspektrum von transluzenten Sandwichstrukturen stellvertretend aufzeigen und sich für eine vergleichende Betrachtung gut eignen. Dabei handelt es sich um Projekte, bei denen Mehrfachstegplatten aus PC, Wellenstegplatten aus GFK und 3D-Wabenplatten aus PC zur Anwendung kamen. Besonders im Blickpunkt der Betrachtung stehen Art und Weise der konstruktiven Verwendung, der gewählten Verbindungstechniken und dessen resultierender Einfluß auf die tektonische Gestalt des Gebäudes.

Projektbezeichnung	Ort (Land)	von	Gebäudetyp	Bereich	Plattentyp, Spezifikation	Planer
Stadion Klagenfurt	Klagenfurt, A	2007	Sport- und Freizeit	Dach	PC-Mehrfachstegplatte weiß	Wien
Pavillon „Stattmann“	Ostfriesland	2006	Pavillon	Fassade + Dach	3D-Wabenplatte PC	Nicola Stattmann / osd
Kubus Holbeinstrasse, Stadel	Frankfurt am Main	2006	Pavillon	Fassade, Vordach	PC-Mehrfachstegplatte	???
Wohnhaus in Tokyo	Tokyo, J	2006	Wohnen	Fassade + Dach	GFK-Platte mit transluzenter Dämmung	
Busbahnhof Regensburg	Regensburg	2006	Wetterschutz	Dach	3D-Wabenplatte 30 mm	osd + Hausmarke
Beeline Hochregallager, Köln	Köln	2006	Produktion und Gewerbe	Dach	3D-Wabenplatte 30mm	osd + Ortner+Ortner
Sportscenter Holmbladsgade *	Kopenhagen, DK	2005	Sport- und Freizeit	Fassade + Dach	PC-Mehrfachstegplatte, geklemmt	bk+, osd
Pavillon „Stadttraum“	Frankfurt am Main	2005	Pavillon	Fassade + Dach	PC-Hohlkammerplatte weiß	moeve architekten, osd
Zweifamilienhaus *	Mülheim/Freiburg	2005	Wohnen	Fassade + Dach	PC-Mehrfachstegplatte	Pfeifer, Rosa, Kuhn
Atelier	Madrid, E	2005	Ausstellungsgebäude	Fassade	PC-Weiss mehrlagig	M Valdez Blasco
TÜV-Gebäude	Mering	2005	Produktion und Gewerbe	Fassade	PC-Steg- und Wellplatten zweischichtig	terrain: Leonhart & Mayr
Versand- und Bürogebäude *	Gelnhausen	2005	Produktion und Gewerbe	Fassade	PC-Hohlkammerplatte	Hefe Architekten
Wohnhaus Stuttgart	Stuttgart	2005	Wohnen	Fassade	PC-Mehrfachstegplatte weiß	Schindler Architekten
Parkbrücke	Baruth	2004	Brücke	Tragstruktur	GFK-Wellenstegplatte	Schnoor
Fussballstadion	Barakaldo, E	2004	Sport- und Freizeit	Fassade+Dach	PC-Mehrfachstegplatte bedruckt	No.Mad Arquitectos
Innovationscenter Aadorf	Aadorf, CH	2004	Produktion und Gewerbe	Fassade	PC-Mehrfachstegplatte	
Laban Centre	London, GB	2003	Sport- und Freizeit	Fassade	PC-Mehrfachstegplatte	Herzog & de Meuron
Papiermuseum	Shizuoka, Tokio, J	2003	Ausstellungsgebäude	Fassade + Dach	GFK-Hohlkammerplatte	Shigeru Ban
Turnhalle Buchwiesen *	Zürich-Buchwiesen	2003	Sport- und Freizeit	Fassade	GFK-Steg mit Nanogelfüllung	A+V
Einfamilienhaus mit Atelier	Gleichenberg	2002	Wohnen	Doppelfassade	PC-Mehrfachstegplatte, zweischichtig	Nagler
Talstation Sesselbahn	Arosa, CH	2002	Sport- und Freizeit	Fassade	PC-Rautenstegplatte	Beath & Deplazes
Pavillon 2002 Toyo Ito	Brügge, B	2002	Pavillon	Tragstruktur	3D-Wabenplatte PC im Bodenbereich	Toyo Ito
Fope SRLI	Basel, CH	2002	Messebau	Messebau	3D-Wabenplatte PC	Studio Albanese
Sporthalle	Odate, Japan	2002	Sport- und Freizeit	Dach	PC-Hohlkammerplatte, gebogen	Shigeru Ban
Baumgartner Hagendorn *	Hagendorn, CH	2006	Produktion und Gewerbe	Fassade	3D-Wabenplatte PC	Graber & Stegier
Distributionszentrum *	Bobingen	2000	Produktion und Gewerbe	Fassade	PC-Mehrfachstegplatte	Nagler, Kauffmann
Wohnhaus	Köln	2000	Wohnen	Fassade	PC-Mehrfachstegplatte, zweischichtig	bk+
Peace Pavillon, Biennale	Venedig, I	2000	Pavillon	Messebau	PMMA-Deckschale mit Kern aus verpresstem PP	Fuksas
abb Oerlikon Dübendorf	Zürich-Dübendorf, CH	2000	Produktion und Gewerbe	Fassade	PC-Stegplatte, bedruckt	
Imazato House	Takamatsu, Japan	1999	Wohngebäude	Fassade	PC-Platte	Kishigami Katsuyasu
Einkaufszentrum	Lustenau, CH	1996	Produktion und Gewerbe	vor Fassade	PC-Mehrfachstegplatte	Marques
Ricola Lagergebäude	Mulhouse, F	1993	Produktion und Gewerbe	Fassade + Dach	PC-Stegplatte, bedruckt	Herzog & de Meuron
Freizeitatelier	Espoo, FIN	1992	Sport- und Freizeit	Fassade	PMMA-Hohlkammerplatte, geklebt	Kaakko Laine Liimatainen
Internet-Café Bangkok	Bangkok, TH		Innenausbau	Innenwand	PC-Hohlkammerplatte	
Kaffeehaus Wien	Wien, A		Innenausbau	Innenwand	PC-Hohlkammerplatte	Querkraft Architekten

Bild 2.47: Tabellarische Übersicht recherchierter Projekte, bei denen transluzente Sandwiches zur Anwendung gekommen sind und den architektonischen Gesamteindruck des Gebäudes prägen

* Ausführliche Vorstellung, exemplarisch



Bild 2.48: Ansicht der Halle bei Dämmerung mit geschosshohen, transluzenten Sandwichplatten in der Fassadenebene



Bild 2.49: Zurückgesetzte Fassade: Die 7,8 x 2 m großen Sandwichelemente sind blickdicht und schimmern im diffuse Tageslicht grau



Bild 2.50: Ausbildung der freien Ecke: auf Gehrung gestossene 3D-Wabenplatten, abgedichtet mit transparenter Folie



Bild 2.51: Ansicht von Innen: Erkennbar sind die horizontalen Kernstöße der 7,8 x 2 m großen Sandwichelemente

2.3.2 Fensterfabrik in Hagendorn, Schweiz

Architekt: Graber & Steiger, Luzern

Plattentyp: 3D-Wabenplatte „clear pep UV PC“ 80 mm

Anwendungsbereich: Fassade Halle, Treppenhäuser, Büro
Projektbesichtigung im Juni 2007

Bei dem Gebäude handelt es sich um das Produktions- und Lagergebäude für Fenstersysteme der Firma Baumgartner. Es befindet sich in Randlage des Dorfes Hagendorn mit Ausblicken in die angrenzende Landschaft. Das Tragwerk der Fertigungshalle ist als Stahlfachwerkkrost mit einem quadratischen Stützenraster von 23,22 m konzipiert und kragt allseitig 11 bzw. 14 Meter aus. Die Dachfläche ist begrünt. Architektonisches Ziel war die Schaffung einer weitgehend stützenfreien Halle mit optischer Leichtigkeit und hoher Flexibilität in der Nutzungsaufteilung. Der Produktions- und Lagerfläche ist ein Büro- und Verwaltungstrakt angegliedert. Die Fassadenebene springt auf drei Seiten zurück, die auskragenden Bereiche des Stahldaches bieten witterungsgeschützte Anlieferungs- und Außenlagerflächen (Bild 2.48).

Die zurückgesetzte Fassade besteht aus transluzenten Wabenplatten mit strukturiertem Kern des Typs „clear pep UV PC“ mit einer Stärke von 80 mm. Die Deckschichten sind beidseits aus farblosen transparentem Polycarbonat. Wie Bild 2.49 zeigt, ist die Fassade durch den weiten Dachüberstand gegen Schlagregen und extremen solaren Strahlungseintrag geschützt, die Gesamtfassadenfläche beträgt ca. 2000 m². Die Fassade ist vereinzelt mit verglasten Schiebtoren ausgestattet, Bewegliche Fassadenöffnungen sind teilweise auch mit Wabenplatten ausgefüllt (Bild 2.53). Die 80 mm dicke Wabenplatte hat einen U-Wert von 1,1 W/m²K im Bereich der Produktions- und Lagerhalle (Bild 2.49). Nach Angaben des Bauherrn ist die Plattendicke von 80 mm eher den bauphysikalischen denn den statischen Anforderungen geschuldet. Die Fassade der Büroempore besitzt einen 17 cm tiefen, zweischichtigen Aufbau aus jeweils 80 mm 3D-Wabenplatten und einer mittigen Luftschicht von 1cm, was zu einem Wärmedurchgang von nur 0,56 W/m²K führt. Die Tageslichtausbeute ist wie auf Bild 2.52 erkennbar eingeschränkt, vor allem aufgrund des großen Dachüberstandes. Im Bereich der Halle ermöglicht die einschichtige Ausführung aber eine tiefe, gleichmäßige Innenausleuchtung ohne Blendung. Auf der Innenseite gibt es keine störende Reflexion, von außen verbirgt die Fassade die innenliegende Stützkonstruktion des Primär-

tragwerks und trägt zum Eindruck eines „schwebenden“ Daches bei. Besonders deutlich zeigt sich der starke Lichtstreuungseffekt der farblosen Wabenplatten von Außen. Die Außenseiten wirken je nach Sichtwinkel grau und matt. Besonders bei indirekter Lichtsituation ist die räumliche Mikrostruktur des Kerns nicht mehr wirklich erkennbar. Eine Blickdurchlässigkeit ist bei Tage nicht gegeben, verstärkt auch durch Spiegeleffekte der außenseitigen Polycarbonat-Deckschichten, die in der Großfläche zudem eine leichte Welligkeit in der Fassadenoberfläche aufweisen (Bild 2.53). Bei Dunkelheit aber wird der illuminierte Innenraum von außen wahrnehmbar, die Wabenplatten lassen schemenhafte Durchblicke zu (Bilder 2.48 / 2.49).

Das Plattenmaß von 7,8 x 2 Meter ist beachtlich und ermöglicht eine geschoßhohe Ausführung ohne Querriegel bei lediglich 10,9 kg/m² Flächengewicht. Die Plattengröße erfordert allerdings horizontale Kernstöße im Abstand von etwa 1,60 Meter, die Deckschichten laufen vollflächig durch. Die Kernstöße in der Platte sind teilweise unsauber ausgeführt, das Plattenmuster ist stellenweise nicht durchgängig und stört den visuellen Eindruck auch aus größerer Entfernung (Bild 2.51). Die Sandwichelemente spannen in horizontaler Richtung über 2 Meter und sind umlaufend auf Pfosten und Riegeln aus Kanthölzern 20/10 cm fixiert. Die Gesamttiefe der Fassadenkonstruktion ist mit fast 30 cm relativ groß. Die Plattenränder sind umlaufend mit einem Kantenschutz abgedichtet und werden ffügtechnisch wie Glasscheiben behandelt (Bild 2.55). Konventionelle Klemmleisten aus Holz bzw. Stahl sorgen für die Abdichtung und die Befestigung. Bild 2.50 zeigt die gelungene Ausbildung der freien Fassadenecken durch Gehrungsschnitte und Abdichtung mit transparenten Klebebändern.

Nach Aussage des Bauherrn gab es seit Fertigstellung keine bautechnischen Probleme durch Witterungseinflüsse bzw. durch Temperaturdehnungen aufgrund der Plattengröße. Dies dürfte wohl vor allem darauf zurückzuführen sein, dass die zurückgesetzte Fassade vor extremen Witterungseinflüssen geschützt ist und die Wabenplatte aufgrund ihrer stabilen Struktur den angreifenden Lasten gut widersteht. Besonders gelobt wird von den Mitarbeitern das hohe und gleichmäßige Helligkeitsniveau in der Produktionshalle (Bild 2.54).

Im Mai 2007 mussten mehrere Sandwichplatten ausgetauscht werden, da die Klebefuge zwischen Wabenkern und Deckschicht fertigungsbedingte Schwachstellen aufwies. Die Montage der Platten soll aber nach Angabe des Bauherrn schnell und unkompliziert verlaufen sein.



Bild 2.52: Doppelschalige Fassade aus 3D-Wabenplatten im Bürotrakt mit einer Wanddicke von 17 cm, verglaste Fensteröffnungen



Bild 2.53: Toranlage mit 3D-Wabenplatten, Spiegeleffekte der äußeren Polycarbonat-Deckschicht bei Tageslicht



Bild 2.54: Geschoßhohe Fassadenelemente im Hallenbereich nach Montage, Unterkonstruktion aus BSH-Kanthölzern 200/100 mm



Bild 2.55: Klemmfassade: Geschraubte Klemmleisten aus Holz, rechts Fassadenöffnung mit Isolierverglasung



Bild 2.56: Klassentrakt (links) und angebaute Doppelturnhalle mit einer Gebäudehülle aus gefüllten GFK-Wellenstegplatten



Bild 2.57: Nord- und Ostfassade der Turnhalle mit 2,5 x 5,5 m großen Fassadenelementen



Bild 2.58: Ansicht Sandwichelement: Horizontale Orientierung der Stege, Klemmleisten aus Aluminium



Bild 2.59: Freie Fassadenecke mit aussilikonisierter Fuge, Kontaktzonen des Wellenstegs an Deckschichtinnenseite erkennbar

2.3.3 Turnhalle in Zürich-Buchwiesen, Schweiz

Architekt: Vrendli und Arnold Amsler, Zürich

Plattentyp: GFK-Wellenstegplatte „Scobatherm“ 50 mm

Anwendungsbereich: Fassade und Shed-Dach

Projektbesichtigung im Juni 2007

Die Schulanlage Buchwiesen in Zürich wurde im Jahre 2003 erweitert und Doppelturnhalle in den Ausmaßen 46 x 24 x 9 Metern versehen (Bild 2.56). Hauptbestandteil des Anforderungsprofils war die Schaffung einer blendfreien Tageslichtversorgung der Turnhalle. Die Belichtung des angrenzenden Klassentraktes musste zudem durch die Turnhalle erfolgen, was die Anforderungen an die zu erreichende Grundhelligkeit in der Halle weiter erhöhte.

Zum Einsatz kamen Wellenstegplatten aus GFK mit einer Bautiefe von 50 mm. Die Hohlräume wurden mit Aerogel-Granulat verfüllt. Zur Verkleidung des Shed-Daches wurden 1000 m² Sandwichelemente, für die vertikale Nord-, Ost- und Westfassade ca. 350 m² verbaut.

Die zusätzliche Verfüllung der 50 mm dicken Wellenstegplatte führte nach Angaben des Herstellers¹⁴ zu einer hohen Dämmwirkung von 0,48 W/m²K. Daraus resultierte auch ein reduzierter Licht- und Energiedurchlass von 0,25, der es ermöglichte, auf einen zusätzlichen Sonnenschutz zu verzichten. Die EMPA Zürich bescheinigte nach einer Untersuchung der Licht- und Temperaturverhältnisse im Sommer 2004 gute Klimaverhältnisse in der Turnhalle bei Dauerlüftung.¹⁵ Die geforderte helle und blendfreie Tageslichtsituation wird durch den hohen Streueffekt der Platten und des großen, reinen Fassadenflächenanteils gewährleistet. Nach Angabe von [pfä05] konnten aufgrund des unbrennbaren Aerogels und einer FlammSchutzausstattung die Brandklasse B1 „schwer entflammbar - nicht brennend abtropfend“ erreicht werden.¹⁶ Das Sandwichelement wiegt 14 kg/m² und ist damit etwa halb so schwer wie ein gewöhnliches 24 mm dickes Isolierglaselement (6/12/6). Die Verfüllung mit Aerogel bewirkt tagsüber ein opakes Erscheinungsbild des Sandwichelements, die Aussendeckschicht schimmert grau. Die Innenseiten wirken aufgrund der Lichttransmission leuchtend weiß. In der Dunkelheit kehrt sich dieser Effekt bei künstlicher Beleuchtung des Innenraums um (Bilder 2.57 / 2.60).

14 [sco06]

15 [det05-11] S.1292

16 [bba05] S. 5

Im Dachbereich spannen die Platten mit ihren Stegen in Gefällerrichtung. Die Ausführung in GFK und die gewählte Plattendicke ermöglicht die Begehbarkeit und Durchbruchssicherheit sowie Hagelschlag-Resistenz. Dem Werkstoff wird UV-Stabilität und eine hohe Dauerhaftigkeit bescheinigt. Die Platten sind für erhöhte Schneelasten von 3 kN/m^2 ausgelegt. Im Dachbereich wurden 171 Platten der Abmessungen $2,5 \times 2,1\text{ m}$, linienförmig umlaufend gelagert eingebaut (Bild 2.61). Die Fixierung und Abdichtung erfolgte durch Klemmleisten. Zur konstruktiven Entwässerung wurde der innere Rand der Platten bereits bei Fertigung stufenartig ausgebildet. Beachtlich erscheint der reduzierte Montageaufwand. Der Einbau der Dachelemente soll an 2 Tagen durch 3 Arbeiter ohne Kran erfolgt sein, was die Logistikkosten erheblich reduziert hätte.¹⁷

In der Fassade sind die Stege der Sandwichelemente horizontal über die kurze Spannweite von 2,5 Meter orientiert. Die fertigungsbedingten Überlappungen der Wellenstege in der Platte sind auf der Innenseite als dünne dunkle Streifen erkennbar (Bild 2.60). Die Stirnseiten der Platten sind rundum geschlossen. Die Befestigung der Elemente erfolgt umlaufend auf den Stützen des Primärtragwerks und Fuß- und Kopfriegen, was den Verzicht eines sekundären Fassadentragwerks ermöglichte. In den Außenecken sind die Deckschichten gestoßen und die Fuge mit Silikon abgedichtet. Das durchschnittliche Flächengewicht der reinen Fassadenkonstruktion beträgt nach eigener Schätzung ca. 16 kg/m^2 und deckt sich dabei trotz etwa 50% höherer Materialrohichte des GFK-Sandwichs in etwa mit dem Wert der PC-Sandwichfassade in Hagendorn. Die Holzpfosten wurden dabei nicht berücksichtigt, da sie dem Haupttragwerk zuzuordnen sind.

Die Ausbildung als großflächige Wand- und Deckenscheiben im gezeigten Projekt bescheinigt der Wellenstegplatte günstige statisch-konstruktive Eigenschaften, die die Ausbildung eines sekundären Fassadentragwerks überflüssig machen. Die verhältnismäßige Kleinteiligkeit des Primärtragwerks mit Binderabständen von lediglich 2,5 m kommt dem aber sicherlich entgegen. Die Verfüllung des Kernhohlraumes ermöglicht wie gezeigt sehr gute bauphysikalische Eigenschaften, der transluzente Charakter geht jedoch etwas verloren. Der visuelle Zustand der Fassadenoberfläche kann nach 4 Jahren als sehr gut bezeichnet werden, schwerwiegende Bauschäden wurden nicht festgestellt.



Bild 2.60: Innenansicht: Unten Glasband, Fassadenelemente direkt an Primärtragwerk befestigt, keine weitere Fassadenunterkonstruktion



Bild 2.61: Innenansicht Sheddach-Elemente: Sandwichelemente mit Stegen in Gefällerrichtung. Streuwirkung bei Sonnenlicht



Bild 2.62: Seitenansicht Fassade: horizontale Mikrostruktur der Sandwichelemente erkennbar, Fassade schimmert grau



Bild 2.63: Transluzente Fassade des Distributionszentrums Bobingen aus PC-Mehrfachstegplatten

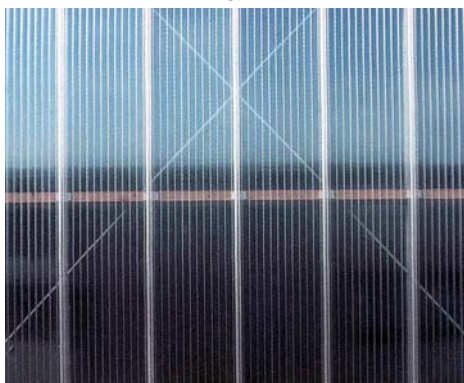


Bild 2.64: Ansicht der Fassade mit transparenten Stegplatten, Sogankern und horiz. Querriegeln



Bild 2.65: Ansicht des Fassaden-Fußpunktes

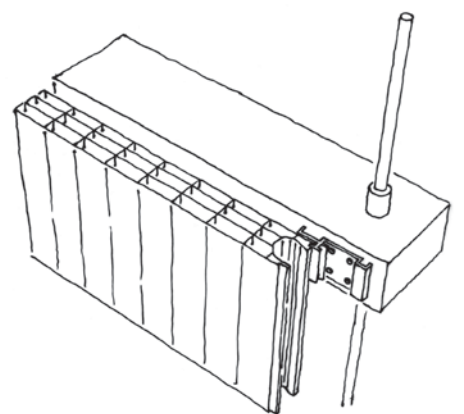


Bild 2.66: Prinzip der Fassadenkonstruktion

2.3.4 Distributionszentrum in Bobingen

Architekt Florian Nagler, München

Plattentyp: PC-Mehrfachstegplatte „Rodeca“ 40 mm

Anwendungsbereich: Fassade

Projektbesichtigung im Juni 2006

Die Halle zur Lagerung und Endbearbeitung von Leimhölzern hat eine Fläche von 76x43 Metern und ist 10 Meter hoch. Ein eingeschränktes Budget und ein enger Terminrahmen erforderten eine pragmatische und günstige Lösung. Der Baukörper sollte eine hohe Funktionalität aufweisen und für gute Arbeitsbedingungen sorgen. Die Fassade war als transluzente Außenhaut zur Bereitstellung von ausreichend blendfreiem Tageslicht angedacht. Sie sollte gleichzeitig eine Wechselbeziehung zwischen Innen und Außen herstellen. Zur Inszenierung des Konstruktionswerkstoffes Leimholz wurde ein zweischiffiges, innenliegendes Tragwerk konzipiert, das durch die Fassade auch von außen wahrnehmbar sein sollte.

Das geforderte Helligkeitsniveau wurde durch Verwendung extrudierter Polycarbonat-Stegplatten erreicht. Die Verwendung dieses Plattentyps stellte auch eine kostengünstige Lösung dar. Das Sandwichelement verfügt über drei Hohlkammerschichten, die Deckschichten und Stege sind transparent ausgebildet. Die Plattenstärke von 40 mm begrenzt nach Herstellerangaben den Wärmedurchgang auf $1,65 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der Extrusionsprozess ermöglichte die gebäudehohe Ausbildung des Sandwichelements mit einer Länge von 10 Metern und einer Breite von lediglich 500 mm bei einem Elementgewicht von nur ca. 20 kg. Die Sandwichelemente sind am Fußpunkt fest und am Traufpunkt, zur Aufnahme thermisch bedingter Längenänderungen, frei verschieblich in Aluminium-U-Profilen gelagert. Die Stege der Sandwichelemente sind vertikal orientiert, um die geforderte Belüftung und Abfuhr von Feuchtigkeit in der Kernschicht zu gewährleisten. Die Platten spannen als Mehrfeldträger.

Das dem Entwurfskonzept zugrundeliegende strenge orthogonale Konstruktionsraster wird in der Fassade gestalterisch inszeniert. Die Gebäudehülle ist durch einen klaren hierarchischen Aufbau gekennzeichnet: zangenförmige Holzpfosten des Primärtragwerks stehen im Abstand von 6 Metern, woran horizontale Fassadenriegel aus Holz im Abstand von 1,3 Metern befestigt sind, die als Unterkonstruktion für die vertikal spannenden Mehrfachstegplatten fungieren. Zuelemente reduzieren die

Spannweite der Querriegel auf 2 Meter. Die Fügung der Platten untereinander erfolgt durch nut- und federförmige Ausbildung der Längsränder, die einen formschlüssigen und dichten Verbund ermöglichen. Gegen Windbeanspruchung sind die Platten punktweise mit Sogankern an den Fassadenriegeln fixiert, die von der Innenseite in die Nut- und Federverbindung formschlüssig eingreifen (Bild 2.66). Durchstoßpunkte werden so vermieden, die thermoplastischen Platten können sich zudem zwangsfrei ausdehnen. Der Verzicht auf horizontale Fugen in der Gebäudehülle erhöht die Schlagregendichtheit. Die Fügung ermöglicht eine homogene Fassadenoberfläche mit „Hautcharakter“. Das durchschnittliche Flächengewicht der gesamten Fassadenkonstruktion beträgt ca. 10 kg/m^2 , wobei die fassadenständigen Holzstützen des Primärtragwerks unberücksichtigt bleiben.

Beim Ortstermin fielen vereinzelte Bauschäden auf, die auf mangelnde Dichtigkeit und thermische Dehnungseffekte der Stegplatten zurückzuführen sind. In den Fassadenecken sind die Stegplatten stumpf gestoßen und mit transparenten Winkelprofilen aus Polycarbonat abgedeckt. Unzureichende Abdichtung und horizontale Stöße der Eckwinkel führte vermutlich über die Jahre zur Durchfeuchtung und Algenbildung in den Fugen und Hohlkammern (Bild 2.69). Die horizontale Lagerung am Fuß- und Traufpunkt offenbart ebenfalls Dichtigkeitsprobleme. Am Fußpunkt haben sich teilweise Insekten eingenistet, Feuchtigkeit schlägt sich auf den Deckschichtinnenseiten nieder. Teilweise sind die Platten aus dem oberen Halteprofil gerutscht, was offensichtlich auf die temperaturbedingte Ausdehnung von ca. 30 mm der 10 Meter langen PC-Stegplatten zurückzuführen ist. Der Austausch der leichtgewichtigen Platten ist zwar möglich, aufgrund der ineinandergreifenden Nut- und Federverbindung jedoch vergleichsweise kompliziert, was zu vorübergehenden Lösungen wie in Bild 2.68 führte. Nach Angaben des Personals führt die hohe Transluzenz zu einem Überhitzungsproblem im Sommer. Die großen Rolltore müssten an sonnigen Tagen den ganzen Tag offen stehen, um die hohen Wärmelasten abzuführen.

Insgesamt ist das Projekt aber als angemessene und günstige Lösung für einen Industriebau zu bewerten. Die durchgängige, hierarchische Strukturierung der Konstruktionsebenen verleiht gerade der Gebäudehülle eine hohe tektonische Qualität. Die geringen Spannweiten der Stegplatten erhöhen den Aufwand an Unterkonstruktion, die jedoch architektonisch gut gelöst ist und die Fassadennebene trotzdem filigran erscheinen lässt.



Bild 2.67: Fassadenansicht 2006 bei bewölktem Himmel



Bild 2.68: Vertikal orientierte Mikro- und Makrostruktur der Fassade, Austauschplatte



Bild 2.69: Transparente Ecke mit genieteten Polycarbonatwinkeln und Feuchteschäden



Bild 2.70: Ausblick aus der Lagerhalle



Bild 2.71: Logistikzentrum in Gelnhausen: Ansicht von der Zufahrt auf die Lagerhalle mit zweigeschossigem Bürobereich (vorne)



Bild 2.72: Montage der Gebäudehülle aus PC-Mehrfachstegplatten durch drei Arbeiter im März 2005



Bild 2.73: Schemenhafte Ausblicke durch die Fassade im Bürobereich



Bild 2.74: Abgerundete Eckausbildung durch inneres Ausklinken der Deckschicht und Umformen der Stegplatte

2.3.5 Logistikzentrum „Ikarus“ in Gelnhausen

Architekt C.Hefe, Frankfurt

Plattentyp: PC-Mehrfachstegplatte „Rodeca“ 40 mm, blau

Anwendungsbereich: Fassade

Projektbesichtigung im Juni 2006

Das Gebäude von 2005 ist als Regallagerhalle eines Vertriebs für Designprodukte mit den Abmessungen 65 x 22 x 9,6 Meter konzipiert. Integriert ist ein zweigeschossiger Bürotrakt an der Schmalseite. Das Tragwerk ist als konventionelle Stahlrahmenkonstruktion ausgebildet.

Die Fassade ist umlaufend geschosshoch mit 40 mm starken Mehrfachstegplatten aus transluzentem, blau eingefärbten Polycarbonat verkleidet. Die Platte besitzt 6 Kammern und ermöglicht die Begrenzung des Wärmedurchgangs auf $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$, was einer heutigen Standardisolierverglasung entspricht. Die Elemente sind mit 800 mm etwas breiter als bei dem Projekt in Bobingen, aber ebenfalls geschosshoch ausgebildet. Die Verbindung zwischen den Platten erfolgt systemgetreu nach dem Nut- und Federprinzip durch formschlüssiges Zusammenstecken und punktwiser Fixierung durch Soganker. Der Abstand der horizontalen Fassadenriegel aus quadratischen Stahlhohlprofilen entspricht mit 1,30 Metern in etwa dem Maß in Bobingen. Auch im Bürobereich besteht die Außenhülle aus einer Lage Stegplatten, eingestellte öffnbare Lochfenster mit transparenter Plexiglaseindeckung ermöglichen Ausblicke. Die Fügetechnik bewirkt wiederum eine glatte, durchschimmernde Außenhaut, hinter der sich Unterkonstruktion und Tragwerk schemenhaft abzeichnen.

Bei diesem Projekt besonders zu erwähnen ist die konstruktive Ausbildung der Fassadenecke, wie in Bild 2.74 erkennbar. Eine Stegplatte wurde auf der Innenseite eingeknickt und mittels einer Schablone auf der gesamten Länge von 8 Metern um 90° gebogen. Die Ecke ist nicht kantig, sondern gerundet ausgebildet. Es entfallen additive Maßnahmen zur Abdichtung der Außenecke, das ECKELEMENT lässt sich wie die ebenen Platten fügen. Nach Angabe des Bauherrn stellen die sommerlichen Wärmelasten im Hallenbereich ähnlich wie in Bobingen ein großes Problem dar. Offene Tore und Oberlichter reichen dann für eine ausreichende Lüftung nicht aus. Der Bürobereich verfügt bereits über eine Klimaanlage. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die tektonische Qualität des Projektes Bobingen nicht erreicht wird. Die Fassadenecke ist baukonstruktiv jedoch gut gelöst.

2.3.6 Zwei Wohngebäude

- Wohn- und Atelierhaus Gleißenberg / Oberpfalz

Architekt: Florian Nagler, München

Plattentyp: PC-Mehrfachstegplatte „Rodeca“ 40 mm

Anwendungsbereich: Fassade und Dach

Projektbesichtigung im Juni 2006

Das 13 x 13 Meter große, quadratische Wohngebäude von 2001 ist für eine sechsköpfige Familie mit Künstler-Atelier konzipiert worden. Der Bauherr wünschte ein kostengünstiges und lichtdurchflutetes Haus. Bei der Tragkonstruktion handelt sich um eine Holzständerbauweise auf einem massiven Sockelgeschoss, das in den Hang eingegraben ist. Der kreuzförmige Erdgeschossgrundriss beherbergt vergleichsweise kleine Wohn- und Schlafräume sowie Küche und Sanitärbereiche. Im Dachgeschoss befindet sich das Atelier, das separat erschlossen werden kann.

Die Fassade besteht aus 40 mm starken, vertikal orientierten Mehrfachstegplatten mit der in den beiden vorherigen Projekten bereits erläuterten Fügetechnik. Im Wohnbereich besteht die transluzente Gebäudehülle aus zwei im Abstand von 150 mm positionierten Sandwichelementen. Die innere Stegplatte hat 6, die äußere 2 Kammern. Die Fassadenriegel sind ungefähr im Meterabstand positioniert. Der Zwischenraum kann durch Klappen im Sockel- und Traufbereich kontrolliert be- und entlüftet werden. Die Dreifachstegplatte auf der Außenseite läuft im Obergeschossbereich weiter, die Fassade ist hier entsprechend licht- und strahlungsdurchlässiger als im Wohnbereich. Durch die transluzente Ausbildung der Außenwände wird der tiefe und relativ enge Wohnbereich gut belichtet. Lochfenster mit Glasfüllung ermöglichen Ausblicke und eine direkte Lüftung der Innenräume. Nach Angabe des Bauherrn schützt das „Luftpolster“ der doppelschaligen Sandwichfassade gut vor der winterlichen Kälte und bringt genügend Helligkeit in die tiefen Räume. Ähnlich wie in Bobingen und Gelnhausen stellt der sommerliche Energieeintrag aber ein Problem dar und macht eine permanente Querlüftung an warmen Sommertagen notwendig. Typische Bauschäden wie Insektenbefall oder Feuchtigkeit in der Kernschicht sind auch an diesem Projekt aufgefallen. Das Haus stellt dennoch einen innovativen Beitrag dar, es ist mit weniger als 1000 €/m² ein äußerst kostengünstiges Gebäude und zeigt die Potentiale transluzenter Sandwiches im Wohnungsbau hinsichtlich Belichtung und Dämmwirkung auf.



Bild 2.75: Tag- und Nachtansicht des Wohnhauses



Bild 2.76: Mikro- und Makrostruktur der Sandwichfassade mit durchsichtiger Unterkonstruktion



Bild 2.77: Außenwand der Küche mit zwei öffnenbaren Glasfenstern

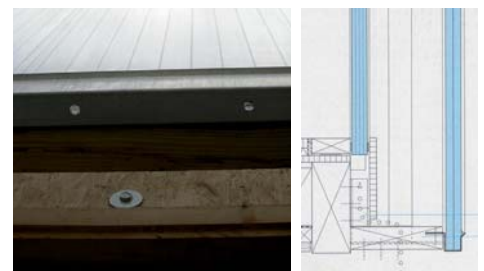


Bild 2.78: Untersicht mit Fliegengitter, rechts Schnitt durch den zweischaligen Fassadensockel



Bild 2.79: Ansicht bei Sonnenschein

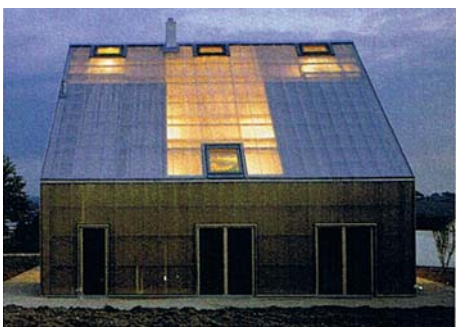


Bild 2.80: Tag- und Nachtansicht



Bild 2.81: Feuchtigkeit in den Hohlkammern im Sockelbereich



Bild 2.82: Dachstuhl- und Fassadenkonstruktion mit Stegplatteneindeckung

- Zweifamilienhaus Müllheim / Baden

Architekt: Pfeifer Roser Kuhn, Stuttgart

Plattentyp: PC-Mehrfachstegplatte „Rodeca“ 40 mm

Anwendungsbereich: Fassade und Dach

Projektbesichtigung im Juni 2006

Das Gebäude von 2005 weist eine ähnliche Kubatur wie in Gleissenberg auf, ist jedoch dreigeschossig und für zwei Wohneinheiten konzipiert. Die Wohnräume befinden sich in zwei giebelständigen Funktionsriegeln. In der Mitte befindet sich ein gebäudehohes „Atrium“ zur Vertikalerschliessung, das wesentlicher Bestandteil des Niedrigenergiehausekonzepts ist (Bild 2.80).

40 mm starke Polycarbonat-Mehrfachstegplatten hüllen alle firstparallelen Außenflächen ein, im Bereich der Funktionsriegel als vorgehängte, hinterlüftete Fassade mit Lochfenstern aus Glas, im Bereich der Dachschrägen als einschichtige transluzente Dacheindeckung. Die Fügung erfolgt systemgetreu wie in Gleissenberg, auch im Bereich der 45°-Dachschrägen. Die transluzenten Stegplatten machen die unterschiedlichen Schichtaufbauten nach außen hin sichtbar. Allein die Platte begrenzt den Wärmedurchgang auf $1,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, die solaren Warmegewinne im Winter reduzieren den Heizenergiebedarf aufgrund des hohen transluzenten Anteils im Dach erheblich. Der zweischalige Aufbau im Bereich der Funktionsriegel ermöglicht nach Angaben des Bauherrn die Abfuhr warmer Luft im Sommer auf der Innenseite durch öffnbare Dachlücken am First, die einen thermischen Kamineffekt bewirken und eine Überhitzung des Innenraums verhindern.

Die Stegplatte spannt als Mehrfeldträger über jeweils einen Meter in vertikaler Richtung vom Sockel bis zur Traufkante und in einem zweiten Element weiter bis zum First. Die Befestigung erfolgt punktwise mit Sogankern. Im offenen Dachbereich führt die konstruktive Überlagerung des Dachstuhls und der Fassadenunterkonstruktion zu einem ungeordnet wirkenden, dreilagigen Aufbau der Holz-Unterkonstruktion. Bild 2.82 zeigt die Überlagerung der Konstruktionselemente: Horizontale Pfetten halten die Sparren, die wiederum die Fassadenriegel halten, welche versetzt zu den Hauptpfetten positioniert sind. Im Vergleich zur Fassade in Bobingen ist keine klare hierarchische Ordnung der Konstruktionsebenen ablesbar. Das Beispiel zeigt auch deutlich, dass die Stegplatten-Spannweite von nur 1 Meter einen relativ großen Aufwand an kleinteiliger Unterkonstruktion notwendig macht.

2.3.7 Sports and Culture Center „Holmbladsgade“ in Kopenhagen, Dänemark

Architekten: Dorte Mandrup & bk+, Kopenhagen/Köln
 Entwurf Tragwerk und Gebäudehülle: osd, Frankfurt/M.
 Plattentyp: PC-Mehrfachstegplatte 40 mm
 Anwendungsbereich: Fassade und Dach

Bei dem Gebäude handelt es sich um eine Sport- und Freizeithalle in einem städtischen Quartier in Kopenhagen. Die architektonische Idee sah die Schaffung eines monolithischen, transluzenten Körpers als Kopfbau eines städtischen Blocks vor, als großzügigen Raum für eine offene Sport- und Freizeitlandschaft. Der Baukörper sollte räumlich als Hybrid aus Halle und Kammstruktur funktionieren. Das Dach ist pultförmig ausgebildet, im Firstbereich nimmt die Dachstruktur die Giebelsilhouette der Nachbarbebauung auf und ist am First entsprechend gefaltet (Bild 2.83).

Die Gebäudehülle sollte als gleichförmige transluzente Haut ohne Unterscheidung von Dach und Außenwänden ausgeführt werden, durchsetzt mit transparenten Lochfenstern. Verwendung fanden Mehrfachstegplatten, die auf innenliegenden horizontalen Fassadenriegeln im Abstand von 1-1,5 Meter befestigt und von außen durch vertikale Klemmleisten gehalten und abgedichtet sind. Es entsteht ein vor allem bei Dunkelheit erkennbares ungerichtetes Fassadenraster, dass durch seine Kleinteiligkeit gekennzeichnet ist. Das Fassadenraster ist auf die Dachfläche appliziert. Die Stege verlaufen zu Entwässerungszwecken in Gefällrichtung, die Unterkonstruktion besteht aus Pfetten in gleichem Abstand. Die Entwässerung der großen Dachfläche wird abschnittsweise durch traufparallele Rinnen gewährleistet. In Anbetracht der großen Hüllflächen von insgesamt ca. 6500 m² trägt die ungerichtete Kleinteiligkeit zur flächigen Wirkung der Gebäudehülle bei.

Die Sandwichhülle in Wand und Dach führt zu einer gleichmäßigen, blendfreien Beleuchtung des fast 50 Meter tiefen Halleninnenraums (Bild 2.86), ebenso die rückseitigen Bereiche. Die hohe Schlagzähigkeit von Polycarbonat war anfänglich ausschlaggebend für die Verwendung dieses Materials in der Gebäudehülle, um Ballwurfsicherheit und eine schnelle Austauschbarkeit kaputter Platten zu gewährleisten. Zudem boten sich extrudierte Stegplatten als kostengünstiges Material für die Verkleidung großer Flächen gerade zu an.



Bild 2.83: Tagansicht des Baukörpers



Bild 2.84: Nachtsicht des Baukörpers: kleinteilige, ungerichtete Fassadenstruktur in Wand und Dach

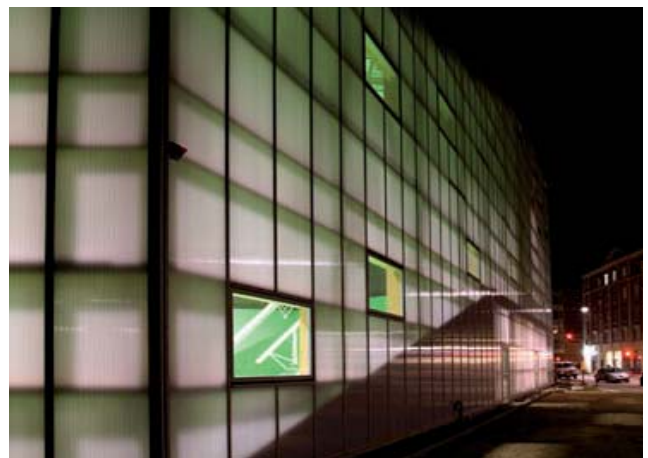


Bild 2.85: Transluzente Sandwichfassade mit horizontaler Holzunterkonstruktion innen und vertikalen Klemmleisten außen



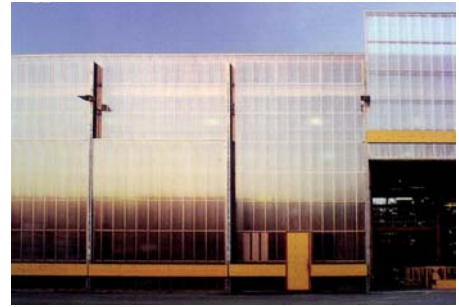
Bild 2.86: Innenansicht des Hallenraums



Bild 2.87: Fensterfabrik Hagendorn



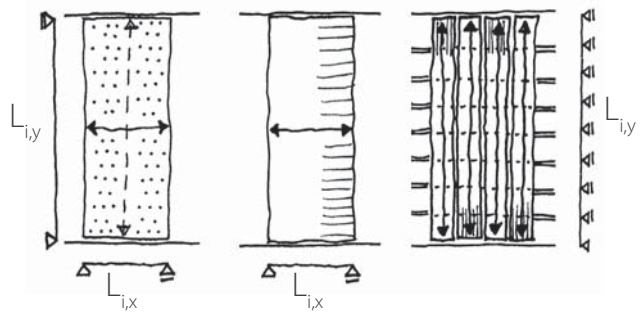
Turnhalle Buchwiesen



Distributionszentrum Bobingen

Vergleich			
Konstruktiver Aufwand von Fassaden aus transluzenten Sandwichen	2.3.1 Fensterfabrik Hagendorn (3D-Wabenplatte 80 mm)	2.3.2 Turnhalle Buchwiesen (GFK-Wellenstegplatte 50 mm) (mit Aerogel-Füllung)	2.3.3 Distributionszentrum Bobingen (PC-Mehrfachstegplatte 40 mm)
(Sandwichhülle + Unterkonstruktion)			
Dicke Sandwich	80 mm	50 mm	40 mm
Elementgröße Platte	2000 x 7800	2500 x 5500	500 x 10000
Spannweite Sandwich Tragsystem	2000 Einfeld	2500 Einfeld	1200 Mehrfeld
Spannrichtung Sandwich Tragwerksanalogie	horizontal (vertikal) Platte	horizontal Plattenbalken	vertikal Balken
Flächengewicht gesamt [kg/m ²]	(12,9) 16,9	16,2	10,7
Flächengewicht Sandwich [kg/m ²]	10,9	14	4,2
Flächengewicht * Unterkonstruktion [kg/m ²]	(2) 6	2,2	6,5
Anteil UK an Gesamtgewicht	(15) 35%	14%	61%
Gesamtgewicht bezogen auf Dicke [mm ⁻¹]	(0,16) 0,21	0,32	0,27

Bild 2.88: * Werte überschlägig ermittelt. Elemente der Unterkonstruktion, die dem Primärtragwerk des Gebäudes zugerechnet werden, wurden in der Gewichtsermittlung nicht berücksichtigt. Es wurden nur Bauteile erfasst, die ausschließlich für die Konstruktion der Fassade notwendig sind. In Klammern sind Werte für die Fassade aus 3D-Wabenplatten (2.3.1) angegeben, wenn die Fassadenpfosten der Primärkonstruktion zugerechnet würden.



2.3.8 Vergleich des konstruktiven Aufwandes

Für einen qualitativen Vergleich des konstruktiven Aufwandes im Bereich der Gebäudehülle eignen sich die drei gezeigten Projekte in Hagendorn, Buchwiesen und Bobingen sehr gut (Bild 2.88): Sie verfügen über ähnliche Gebäudegrößen, die Gebäudehüllen besitzen ein ähnliches Anforderungsprofil, die Unterkonstruktionen bestehen jeweils aus Holz. Es kommen jedoch unterschiedliche Sandwichmaterialien als flächiges Fassadenmaterial zur Anwendung.

In Buchwiesen wurden vergleichsweise hohe bauphysikalische Anforderungen gestellt, die durch die Befüllung der Kernschicht gelöst wurde. Die Verwendung von glasfaserverstärkten Kunststoff macht eine sekundäre Unterkonstruktion überflüssig, da die Platte selbst über 2500 mm von Stütze zu Stütze des Primärtragwerks spannen kann. Der Gewichtsanteil für Klemmprofile und Abdichtung beträgt daher mit 2 kg/m² nur etwa 14%. In Hagendorn sind Primärtragwerk und Hülle voneinander getrennt, weshalb die leichteren 3D-Wabenplatten durch ein zusätzliches Fassadentragwerk aus Holz gehalten werden müssen, was den Gewichtsanteil der Unterkonstruktion mit 6 kg/m² auf 35% erhöht. Ordnet man wie in Buchwiesen die Pfosten der Primärkonstruktion zu, so reduziert sich der

Gewichtsanteil auf einen ähnlichen Wert von 2 kg/m^2 bzw. 15%. Die Spannweite der Wabenplatten beträgt 2,0 m. Die Flächengewichte der beiden Fassaden sind in Summe etwa gleich, der Aufwand an Unterkonstruktion aber geringer als bei der Hülle in Bobingen. Die Hülle besitzt zwar mit 11 kg/m^2 das geringste Flächengewicht, dessen Gewichtsaufwand an Unterkonstruktion von $6,5 \text{ kg/m}^2$ ist aber mit ca. 60% anteilig am höchsten. Die PC-Stegplatten spannen in den gezeigten Projekten als Mehrfeldplatten jeweils auch nur über ca. 1200 mm.

Der tragkonstruktiven Anordnung betreffend ist deutlich geworden, dass die Waben- und Wellenstegplatten horizontal jeweils als Einfeldplatten von Pfosten zu Pfosten, die Mehrfachstegplatten vertikal als Mehrfeldplatte über die horizontalen Querriegel spannen. In den ersten beiden Fällen werden keine horizontalen Fassadenriegel benötigt, was freie Fassadenflächen über die Geschosshöhe ermöglicht.

Die Außenabmessungen der Sandwichelemente in Hagendorn sind mit denen in Buchwiesen vergleichbar, die größere Dicke von 80 mm aus statisch-konstruktiver Sicht ist aber fragwürdig. Es fällt auf, dass die großformatigen Platten fügetechnisch wie Glasscheiben behandelt und durch konventionelle Klemmsysteme gehalten werden. Die Klemmleisten sind mit 80-100 mm relativ breit, um eine effektive Klemmwirkung über die großen Plattenstärken von 50 bzw. 80 mm zu erreichen. Es besteht zudem die Gefahr der lokalen Überbeanspruchung des Kernrandes im Bereich der Klemmung. Dazu kommt das Langzeitkriechen gerade von Thermoplasten, das die Klemmwirkung mit der Zeit abschwächt. Günstiger wäre die gezielte Nutzung der tiefen Kernschichtzone als potentiellen Ort für eine adäquate Fügetechnik, zum Beispiel durch seitlich im Kern angeordnete Steckverbindungen oder Hinterschnitttechniken. Die geringen Spannweiten der Mehrfachstegplatten in Bobingen erfordern eine dichter gestaffelte, aber auch kleinteiligere Unterkonstruktion. Vorteilhaft erweist sich hier die streifenförmige Elementierbarkeit dank der linearen Nut- und Federverbindung, die eine glatte homogene Fassadenoberfläche ermöglicht. Wie im Projekt in Müllheim gezeigt wurde, kann der Aufwand an Unterkonstruktion aber auch zu groß werden, so dass der Eindruck einer leichten Hülle gerade auf der Innenraumseite schwindet und sich ein eher „gewächshausartiger“ Charakter einstellt.

2.3.9 Erste Einschätzungen zur bau- und tragkonstruktiven Eignung

Zusammenfassend lässt sich aufgrund der typologischen Einordnung und der Analyse exemplarischer Projekte feststellen:

- Wabenplatten mit räumlich strukturierten Wabenkern lassen das größte statisch-konstruktive Potential vermuten. Sie entsprechen konstruktionsmorphologisch am ehesten der Sandwichbauweise und lassen sich aufgrund ihres Aufbaus richtungsunabhängig spannen. Aufgrund der kompakten Anordnung geschlossener Waben sind 3D-Wabenplatten sowohl für den sommerlichen als auch winterlichen Wärmeschutz geeignet. Die Blickdurchlässigkeit ist jedoch sehr eingeschränkt und lässt die Platte mit zunehmender Dicke opak erscheinen.
- Prismatische Wabenplatten kommen aufgrund der Schichtfugenproblematik im Außenbereich praktisch nicht vor, sondern werden vorwiegend im Innenausbau und Möbelbau verwendet.

- Wellenstegplatten aus GFK weisen wegen der erhöhten Materialsteifigkeit eine größere Stabilität als extrudierte Stegplatten auf, sind im Vergleich zu diesen jedoch 2-3 mal schwerer. Aufgrund ihrer gerichteten Struktur tragen sie Lasten einachsig ab. Die großen Hohlräume stellen wie gezeigt einen großen Vorteil in Hinblick auf die Verfüllbarkeit zur Optimierung der bauphysikalischen Eigenschaften dar. Dies ist jedoch mit einer rapiden Abnahme der Transluzenz verbunden und lässt die Platte opak erscheinen.

- Extrudierte Stegplatten scheinen aufgrund ihrer Morphologie weniger tragfähig und vor allem weniger formstabil zu sein. Aufgrund ihrer gerichteten Struktur und der produktionsbedingt schmalen und langen Plattenformate erwecken sie den Eindruck balkenförmiger Elemente. Es ist aufgefallen, dass bei Außenanwendungen die Stege aus Belüftungsgründen grundsätzlich vertikal orientiert sind. Ein großes Problem aller vorgestellten Projekte dieses Plattentyps stellt der sommerliche Wärmeschutz dar. Die geringen Spannweiten thermoplastischer Stegplatten erhöhen den Aufwand an einer Unterkonstruktion.

- Thermoplaste wie Polycarbonat sind als großflächige ebene Deckschichten im Außenbereich als kritisch anzusehen, da sie aufgrund thermischer und hydrologischer Einflüsse wellig werden und gerade bei Stegplatten langfristig Feuchtigkeit in die Kernschicht eindringen lassen. In Hagendorn ist die Fassade gut geschützt, aber bei den anderen gezeigten Projekten sind eine beschleunigte visuelle „Alterung“ sowie vergleichbare, typische Bauschäden festzustellen. GFK zeigt sich wesentlich robuster und dauerhafter in der Außenanwendung.

In Kapitel 3 wird das statisch-konstruktive Verhalten der verschiedenen Plattentypen in entsprechenden Versuchsreihen weiter untersucht.

3. Untersuchungen zum Tragverhalten transluzenter

Sandwichstrukturen

3.1 Gegenstand und Ziel der Untersuchungen

3.1.1 Inhaltliche Schwerpunkte

Ziel ist es, die statisch-konstruktiven Eigenschaften transluzenter Sandwichstrukturen in einen gemeinsamen Kontext zu stellen. In drei Versuchreihen werden die in Kapitel 2.2 vorgestellten Plattentypen vergleichend hinsichtlich ihres Trag- und Verformungsverhaltens untersucht. In den Versuchen erfolgt die Simulation der drei grundlegenden Lastzustände Biegung, Druck und Abscheren.

- Die Untersuchungen sollen Aufschluss über das statisch-konstruktive Potential der einzelnen Plattentypen bringen und zu einer Einschätzung führen, welche der Sandwichstrukturen sich grundsätzlich auch für Anwendungen eignen, in denen dem Element eine tragende Funktion zugewiesen wird.

- Ferner sollen die Ergebnisse klären, in wie weit die Plattentypen konstruktionsmorphologisch der Sandwichbauweise entsprechen. Hierzu werden Abweichungen zu theoretischen Kennwerten nach der Sandwichtheorie analysiert und das plattenspezifische Verformungsverhalten auf Übereinstimmung mit typischen Verformungsszenarien idealer Sandwichkonstruktionen überprüft.

- Durch Vergleich statischer Kennwerte wie Steifigkeit und Festigkeit in Relation zum spezifischen Gewicht lassen sich darüberhinaus Aussagen zum Leichtbaupotential der untersuchten Sandwichpaneele machen.

Für eine quantitative Bewertung des statisch-konstruktiven Potentials werden grundlegende statische Kennwerte auf Grundlage der gewonnenen Versuchsdaten ermittelt und zur Bestätigung der visuellen Ergebnisse herangezogen. Da für einige der zu prüfenden Materialien aufgrund ihres Strukturaufbaus die jeweiligen Hersteller nur unzureichende Angaben bzw. widersprüchliche Basiswerte angeben und aufgrund der Vielzahl an Materialvarianten eine direkte Ermittlung bzw. Vergleichbarkeit von Werten nicht immer gegeben ist, reicht eine rein theoretische Betrachtung jedoch nicht aus.

Vor dem Hintergrund erweiterter Anwendungsspektren ist vor allem eine qualitative Einschätzung der statisch-konstruktiven Eigenschaften Ziel der Vergleichsbetrachtung. Dabei steht vorrangig das Zusammenwirken von Deckschicht und Kern unter statischer Beanspruchung im Vordergrund. Schwerpunkte der Beobachtung sind das Stabilitätsverhalten, das Verhalten der Schichtfuge sowie die Feststellung konstruktiver Schwachstellen. Der visuellen Dokumentation kommt hier eine besondere Bedeutung zu. Gerade die Beobachtung und Aufzeichnung der Wechselwirkungen zwischen Deckschicht und Kernschicht sind interessant, da sie sich durch rein theoretische Betrachtungen nur eingeschränkt erschließen. Außerdem lassen sich im Gegensatz zu opaken Bauteilen bei transluzenten Sandwichelementen die trag- und verformungsspezifischen Vorgänge im Gefüge während des Versuchs wesentlich besser beobachten und aufzeichnen.

3.1.2 Versuchsmethodik

Es wird die Eignung des jeweiligen Plattentyps als statisch wirksame Platte und Scheibe untersucht. Ziel ist die Erzeugung eines möglichst einfachen, praxisnahen und eindeutigen Spannungszustandes, um transluzente Sandwichelemente unterschiedlicher Gefüge zu vergleichen. Dabei werden wie in Bild 3.01 gezeigt drei Belastungszustände simuliert, die mehr oder weniger je nach Anwendung zum Beispiel in Fassadenkonstruktionen oder tragenden Strukturen vorkommen können.

1. Belastung auf Biegung: Eignung als Platte

Die Simulation erfolgt durch eine vertikale Flächenlast p , wie sie beispielsweise infolge direkten Winddruckes auf ein Sandwichelement als Fassadenplatte oder aber im Messebau bei Verwendung als Bodenpaneel wirkt. Die Belastung erfolgt quer zum Element und verursacht eine Biegebeanspruchung. Das Tragverhalten charakterisiert das Sandwichelement in seiner Eignung als Platte.

2. Belastung auf Druck: Eignung als Stütze bzw. Scheibe

Die Simulation erfolgt durch die vertikale Kraft P_v infolge von Auflasten bei Verwendung des Sandwichelements als tragendes Wandelement oder bei selbsttragenden Fassadenkonstruktionen. Das Tragverhalten charakterisiert das Sandwichelement in seiner Eignung als Scheibe.

3. Belastung auf Schub: Eignung als Scheibe

Die Simulation erfolgt durch die horizontale Kraft P_H von zum Beispiel durch Windkräfte oder dynamische Lasten belasteten Wandelementen, die als Schubkraft in der Ebene des Wandelements wirkt. Dieser Fall kommt vor allem dann vor, wenn das Wandelement selbsttragend und aussteifend zum Beispiel im Messe- oder Möbelbau eingesetzt wird. Das Tragverhalten charakterisiert das Sandwichelement in seiner Eignung als Scheibe.

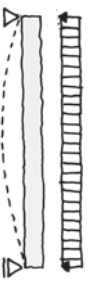
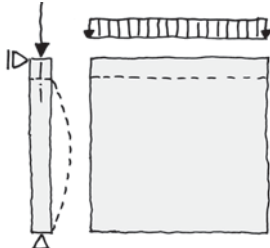
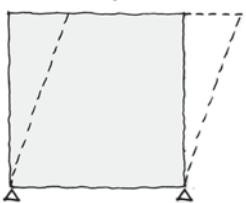
(1)	(2)	(3)
		
Querbelastung	Schubkraft	Normalkraft
Beanspruchung als Platte	Beanspruchung als Scheibe	

Bild 3.01: Belastungsszenarien, nach [sta74]

3.2 Statisch-konstruktive Bewertungskriterien

Eine objektive Deutung der Versuchsbeobachtungen und Ergebnisdaten in Hinblick auf die erläuterte Zielsetzung macht geeignete statisch-konstruktive Bewertungskriterien notwendig. Durch sie lassen sich die Versuchsergebnisse erst in Relation setzen. Diese Bewertungskriterien resultieren aus einer vorhergehenden theoretischen Analyse der drei Lastzustände Biegung, Druck und Abscheren für eine idealtypische Sandwichkonstruktion.

Basierend auf den in Kapitel 1.1 erläuterten statischen Grundlagen sollen daher einleitend noch einmal die wesentlichen Kennzeichen einer idealtypischen Sandwichkonstruktion deutlich werden, die gleichzeitig Bewertungsmaßstab für die zu untersuchenden transluzenten Sandwichstrukturen sein sollen:

Deckschichten

- sollten vollflächig und dünn
- sowie dehnsteif und hochfest sein
- tragen Normalkräfte flächig ab
- schützen die Kernschicht

Kernschicht

- sollte ein geringes spezifisches Gewicht haben
- sollte lediglich Schubkräfte abtragen
- hält die Deckschichten auf einem konstanten Abstand
- erzeugt die statische Höhe des Gesamtgefüges
- stabilisiert die Deckschichten gegen Beulen und Knittern und damit das Gesamtgefüge
- stellt die Kontaktfläche zur schubsteifen Ausbildung der Schichtfuge

Je nach Beanspruchungsform ergibt sich ein charakteristisches Trag- und Verformungsverhalten. Die Wechselbeziehung zwischen Deck- und Kernschicht zeigt unterschiedliche Instabilitäts- und Versagensformen, die Aufschluss über die statisch-konstruktive Qualität des jeweiligen Sandwichverbundes geben. Bild 3.02 zeigt die wesentlichen Geometrie- und Werkstoffparameter zur statisch-konstruktiven Analyse einer Sandwichstruktur, Bild 3.03 die zur optimalen Ausnutzung des Sandwicheffekts notwendigen Werkstoff- und Geometrieparameter.

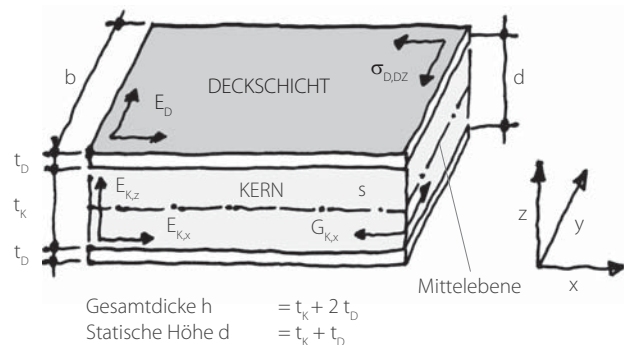


Bild 3.02: Geometrie- und Werkstoffparameter einer Sandwichstruktur

E_D	Materialsteifigkeit/E-modul Deckschicht (isotrop)
E_{Kz}	Materialsteifigkeit/E-modul Kern vertikal
$E_{Kx(y)}$	Materialsteifigkeit/E-modul Kern horizontal
$G_{Kx(y)}$	Schubmodul Kern horizontal
$\sigma_{D,z}$	Zugfestigkeit Deckschicht
$\sigma_{D,D}$	Druckfestigkeit Deckschicht
$\tau_{K,z}$	Schubfestigkeit Kern, vertikal
$\tau_{Kx(y)}$	Schubfestigkeit Kern, horizontal
t_D	Schichtdicke Deckschicht
t_K	Schichtdicke Kernschicht
d	Statische Höhe = Achsabstand Deckschichten
s	Zellengröße Kern (Stegabstand, Wabenabstand)

Tragverhalten	Deckschicht	Kernschicht
Hohe Tragfähigkeit	Festigkeit $\sigma_{D,z}$	Kernschichtdicke t_K
durch hohe Werte von	Schichtdicke t_D (im Verhältnis zu s)	
Geringe Verformung	Materialsteifigkeit E_D (Elastizitätsmodul)	Schubmodul G_{Kx}
durch hohe Werte von		Kernschichtdicke t_K
Hohe Stabilität	Materialsteifigkeit E_D (Elastizitätsmodul)	Materialsteifigkeit E_{Kz} quer zur Fläche
durch hohe Werte von	Schichtdicke t_D (im Verhältnis zu s)	Schubmodul G_{Kx}
		geringe Zellengröße s

Bild 3.03: Wahl der Werkstoff- und Geometrieparameter für eine hohe Ausnutzung des Sandwicheffekts

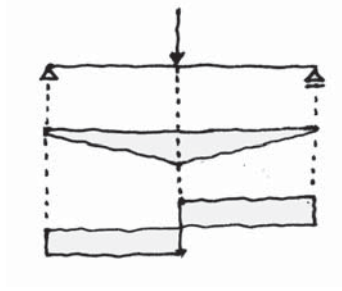


Bild 3.04: Modellsystem Einfeldträger mit mittiger Einzellast P

3.2.1 Beanspruchung auf Biegung

Im folgenden sollen grundlegende statische Zusammenhänge und wesentliche Kennwerte an einem biegebeanspruchten Plattenstreifen der Breite b veranschaulicht werden. Angenommen wird eine mittig angreifende Einzellast P quer zum Sandwichelement. Es erzeugt Biegemomente und Querkräfte im Sandwichgefüge (Bild 3.04).

3.2.1.1 Tragfähigkeit

Das Biegemoment M bewirkt ein in den Deckschichten wirkendes Kräftepaar, das in Form flächig wirkender Druck- und Zugkräfte abgetragen wird (Bild 3.05). Die resultierenden Zug- und Druckspannungen $\sigma_{D,D}$ und $\sigma_{D,Z}$ hängen von der Deckschichtdicke t_D und dem Hebelarm des Kräftepaares d ab, wie Gleichung (1) zeigt:

$$(1) \quad \sigma_{D,d} = \sigma_{Z,d} = \frac{M}{t_d \cdot d \cdot b} \quad [\text{kN/cm}^2]$$

Die dünnen Deckschichten übertragen idealerweise nur die aus dem Kräftepaar resultierenden Normalkräfte, weshalb ihre Eigenbiegesteifigkeit sehr klein sein kann. Nur mit dünnen Schichtdicken lässt sich der Sandwicheffekt nutzen, da sich die Deckschichten dann nicht am Querkrafttransport beteiligen. Je größer die Eigenbiegesteifigkeit der Deckschichten gegenüber der Gesamtbiegesteifigkeit ist, desto weniger kommt die eigentliche Sandwichtragwirkung zur Geltung, d.h. die Deckschichten übernehmen den größten Teil der Schnittlasten unmittelbar durch Eigenbiegung. Gl. (1) zeigt auch, dass höhere Materialfestigkeiten der Deckschichten bei gleichzeitiger Reduzierung der Schichtdicken die Effizienz von Sandwichen erhöhen können.

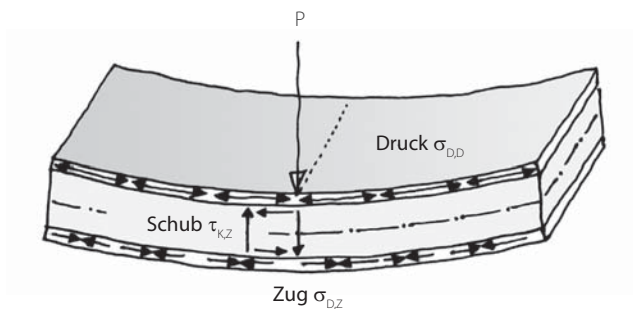


Bild 3.05: Innere Schnittkräfte und Spannungen im biegebeanspruchten Sandwichgefüge

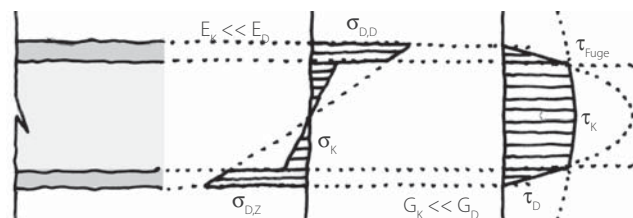


Bild 3.06: Unstetige Spannungsverläufe im idealen Sandwichbalken:

- Biegespannungen σ , vor allem in den Deckschichten
- Schubspannungen τ , vor allem Kern: der Wert an der Unstetigkeitsstelle entspricht der Schubspannung in der Schichtfuge, nach der z.B. der Klebstoff bemessen wird [kle05] S.197f.

Das Moment bewirkt zudem wie in Bild 3.05 gezeigt eine Querkraftbeanspruchung, die idealerweise nur durch die Kernschicht abgetragen wird. Die Kernschicht muß vor allem Schubspannungen $\tau_{K,z}$ senkrecht zur Mittelebene widerstehen können und nicht zusammendrückbar sein, was bedeutet, dass dessen Elastizitätsmodul $E_{K,z}$ groß sein sollte. Das innere Kräftegleichgewicht führt zur Beanspruchung der Schichtfugen auf Horizontalschub und erzeugt im Klebstoff bzw. im Material flächenparallele Schubspannungen (Bild 3.06).

3.2.1.2 Verformungen

Die Gesamtdurchbiegung eines Sandwichelements setzt

sich aus zwei Anteilen zusammen, nämlich aus der reinen Biegeverformung w_b und der Schubverformung des Kerns w_s . Bei der Methode der Partialdurchsenkung werden beide Anteile wie in Bild 3.07 gezeigt aufaddiert¹. Für die resultierende Durchbiegung gilt demnach:

$$(2) \quad w_{\text{ges}} = w_b + w_s$$

- Verformung durch Biegung

Gl. (3) zeigt den Biegeverformungsanteil w_b für eine Belastung P über die Spannweite l . Der Faktor k hängt vom jeweiligen Trag- und Lastsystem ab und kann aus üblichen Statik-Tabellen² entnommen werden.

$$(3) \quad w_b = k \cdot \frac{P}{B} \cdot l^3 \quad [\text{cm}]; \quad k=48 \text{ für Beispiel}$$

B ist die Biegesteifigkeit, die bei homogenen Werkstoffen üblicherweise als Produkt aus Material- und geometrischer Steifigkeit in der Form $E \times I$ definiert ist. Da im Sandwichelement unterschiedliche Werkstoffe im Verbund zur Anwendung kommen, gilt für B :³

$$(4) \quad B = E_D \cdot \left(\frac{d^2 \cdot t_D}{2} + \frac{t^3}{6} \right) \cdot b + E_{K,x} \cdot \frac{t_K^3}{12} \cdot b \quad [\text{kNm}^2]$$

Mit der Annahme, dass $E_{K,x} \ll E_D$ und die Eigenbiegesteifigkeit der Deckschichten wie bereits erläutert vernachlässigbar ist, lässt sich auch ansetzen:

$$(5) \quad B \approx E_D \cdot \frac{t_D \cdot d^2 \cdot b}{2} \quad [\text{kNm}^2]$$

Diese Formel gilt nach [kle05] als hinreichend gute Näherung für Verhältnisse der Deckschichtdicke t_D zur Gesamtdicke $h < 1/4$. Je größer die Biegesteifigkeit ist, desto kleiner ist der Verformungsanteil durch reine Biegung. Gl. (5) zeigt die für eine hohe Biegesteifigkeit notwendige Materialsteifigkeit E_D des Deckschichtmaterials und den großen Einfluss des axialen Deckschichtensabstandes d .

- Verformung durch Schub

Die Kernschicht verformt sich gemäß Bild 3.08 durch Schubbeanspruchung parallelogrammartig und erzeugt einen Verformungsanteil in Z-Richtung. Die Schubsteifigkeit S ist maßgeblich mit dem Schubmodul des Kernmaterials G_K verbunden, der je nach Kernstruktur richtungsabhängig unterschiedlich sein kann. Gl. (6) zeigt den

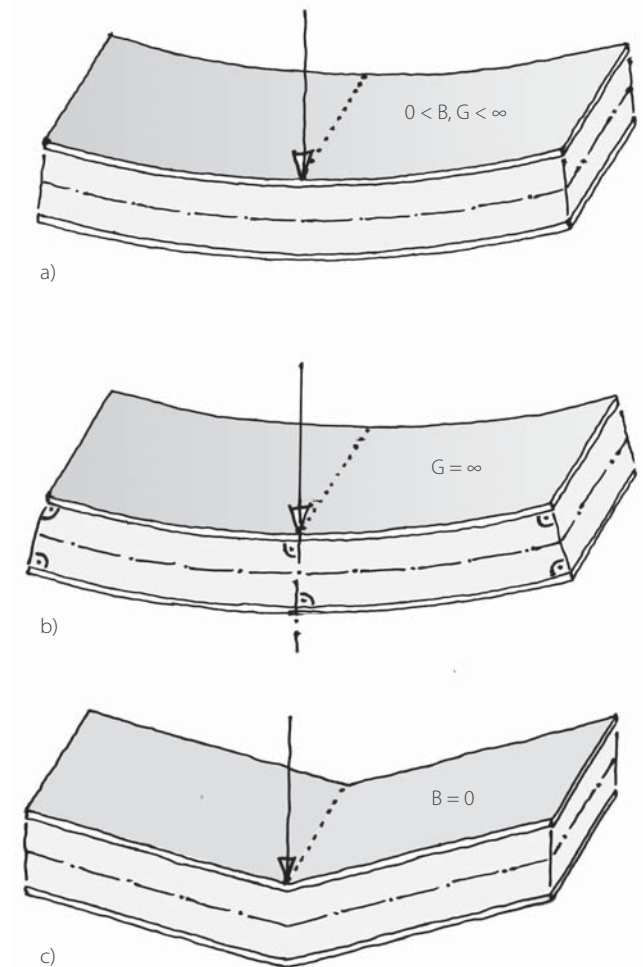


Bild 3.07: Prinzip der Partialdurchsenkung:

- a) Biege- und Schubverformung kombiniert
- b) nur Biegeverformung ($G = \infty$)
- c) nur Schubverformung ($B = 0$)

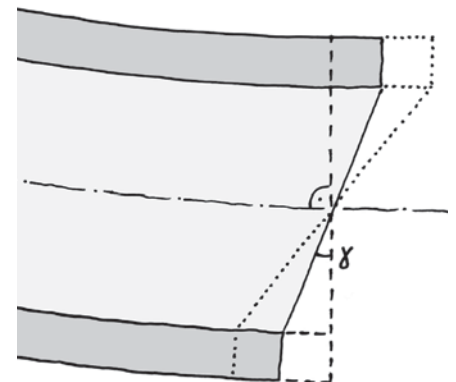


Bild 3.08: Verformung am Auflager aufgrund überlagerter Biege- und Schubverformung (Extremfall Biegeverformung gestrichelt, Extremfall Schubverformung gepunktet).

1 [kle05] S.202
2 [füh03] S.45
3 [kle05] S. 197f.

Verformungsanteil w_s nach [sta74] S.248:

$$(6) \quad w_s = \frac{P \cdot l}{k \cdot G \cdot d \cdot b} \quad [\text{cm}] \quad k=4 \text{ für Einfeldträger mit Einzellast}$$

Je größer der Schubmodul der Kernschicht, desto geringer ist der Verformungsanteil. Es überwiegt tendenziell die Biegeverformung, vor allem wenn die Platten nicht zu dick und der Kern eine hohe Schubsteifigkeit aufweist. Bei weichen Kernen und kurzen Platten großer Dicke ist der Anteil der Schubverformung größer. Bei weitgespannten Sandwichstrukturen mit ungerichteten, dichten Kern wird häufig die Gesamtverformung der Biegeverformung gleichgesetzt. Die Differenzierung von Biege- und Schubverformung fällt gerade bei räumlich strukturierten Kernen schwer. Möchte man den Schubanteil und Kennwerte wie S oder G für den Kern ermitteln, berechnet man die Biegeverformung über die gängigen Gleichungen (3) und (5) und zieht diesen Anteil nach Gl. (2) von der gemessenen Gesamtverformung ab. Diese Vorgehensweise wird teilweise auch in der Versuchsauswertung angewendet, um Aussagen zur Schubverformung zu erhalten.

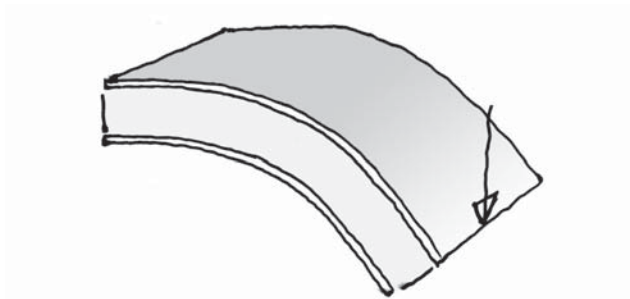


Bild 3.09: Biegeverformung aufgrund zu dehnweicher Deckschichten

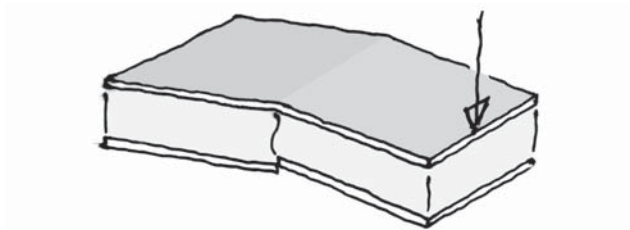


Bild 3.10: Bruch der Deckschicht- und/oder Kernschicht infolge Festigkeitsüberschreitung Deckschicht bzw. Instabilität des Kerns

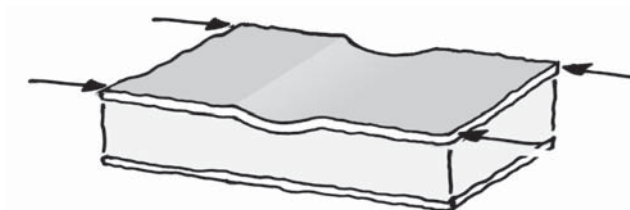


Bild 3.11: Lokales Beulen der druckbeanspruchten Deckschicht infolge Instabilität des Kerns

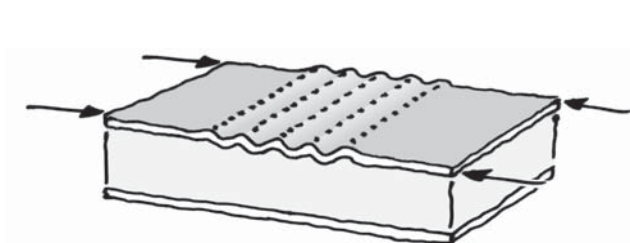


Bild 3.12: Knittern der druckbeanspruchten Deckschicht infolge unzureichenden Verbundes zwischen Kern und Deckschicht

3.2.2.3 Typische Instabilitäts- und Versagensformen

- Geringe Biegesteifigkeit

Bild 3.09 zeigt eine hohe Verformung aufgrund zu geringer Biegesteifigkeit, hervorgerufen durch zu dehnweiche Deckschichten, zu geringer Gesamtdicke oder zu schubweicher Kernschicht.

- Bruch von Deckschicht und/oder Kernschicht

Bild 3.10 zeigt den Bruch einer der beiden Deckschichten infolge Überschreitung der Zug-/Druckfestigkeiten; Bruch einer strukturierten Kernschicht infolge Instabilität z.B. durch Ausbeulen der Stege bei zu großer Schubbeanspruchung senkrecht zur Mittelebene.

- Eindringen Kernschicht (Bild 3.11)

Diese Verformung entsteht in der Druckzone. Die Deckschicht drückt infolge des Überschreitens der Kern-Schubfestigkeit lokal in den Kern ein. Es stellt sich eine Lastexzentrizität ein, die den Vorgang weiter beschleunigt und zum Durchschlagen der Gesamtstruktur führen kann.

- Knittern der druckbeanspruchten Deckschichten

Die Deckschicht in der Druckzone knittert in Bild 3.12 aufgrund zu geringer Dehnsteifigkeit oder aufgrund unzureichenden Verbundes mit dem Kern, siehe auch 3.2.2.3.

3.2.2 Beanspruchung auf Druck

In der Folge werden statische Bewertungskriterien druckbeanspruchter Sandwichelemente aufgezeigt. Ein Plattenstreifen der Breite b wird mit einer zentrischen Last P längs zur Plattenebene beansprucht. Die Lasteinleitung muß gleichmäßig auf den Plattenquerschnitt erfolgen.

3.2.2.1 Tragfähigkeit

Für ein idealtypisches Sandwich wird angenommen, dass die Last gleichmäßig von beiden Deckschichten als Normalkraft aufgenommen wird, da der Kern in Flächenrichtung biegeweich ist und zur Lastabtragung ausfällt⁴ (Bild 3.13). Dies führt zu flächigen Druckspannungen σ_D in den Deckschichten:

$$(7) \quad \sigma_D = \frac{P}{2 \cdot t_D \cdot b} \quad [\text{kN/cm}^2]$$

Ähnlich wie bei Biegebeanspruchung ist ersichtlich, dass die Tragfähigkeit maßgeblich durch Schichtdicke und Materialfestigkeit der Deckschicht bestimmt wird.

3.2.2.2 Verformungen

Die flächige Lastabtragung über die Deckschichten bewirkt im elastischen Bereich eine Stauchung ε . Sie ist nach dem Hook'schen Gesetz proportional zur Dehn- bzw. Drucksteifigkeit D des Sandwichelements:

$$(8) \quad \varepsilon = \frac{P}{D}$$

Die Kernschicht ist in einem idealtypischen Sandwich in Lastrichtung weich und macht die Verformung entsprechend mit (Bild 3.14). Aus diesem Grund kann statt

$$(9) \quad D = 2 \cdot E_D \cdot t_D \cdot b + E_{K,x} \cdot t_K \cdot b \quad [\text{kN}]$$

die Dehnsteifigkeit D nach [kle05] vereinfacht mit

$$(10) \quad D \approx 2 \cdot E_D \cdot t_D \cdot b \quad [\text{kN}]$$

angesetzt werden. Es wird deutlich, dass die Dehnsteifigkeit direkt von der Materialsteifigkeit E_D des Deckschichtmaterials und dessen Schichtdicke t_D abhängt, Art und Dicke des Kerns aber unerheblich sind.



Bild 3.13: Situation der Lasteinleitung

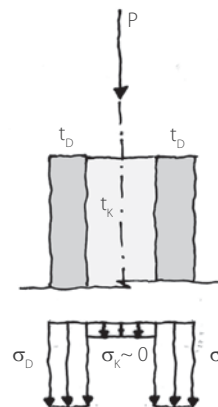


Bild 3.14: Lastabtrag durch die Deckschichten, Spannungs- und Steifigkeitsverteilung in der idealtypischen Sandwichstruktur

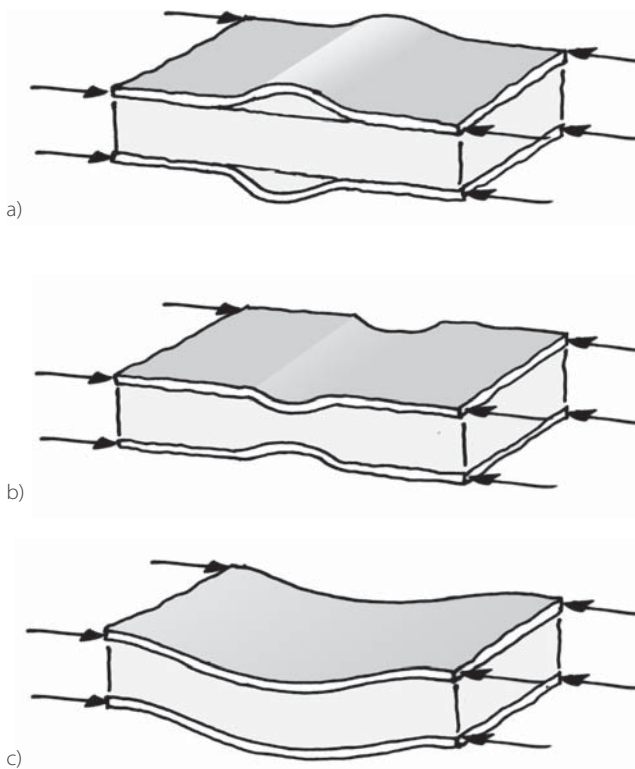


Bild 3.15: Lokales Beulen aufgrund Druckbeanspruchung

- a) symmetrisch, Aufreißen des Kerns oder der Schichtfuge
- b) symmetrisch, Deckschichten drücken in den Kern
- c) asymmetrisch, Schichten weichen aus, ggf. bricht die Schichtfuge auf

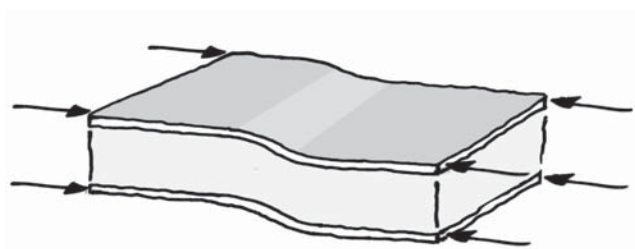


Bild 3.16: Außermittiges Beulen durch zu geringen Schubmodul des Kerns

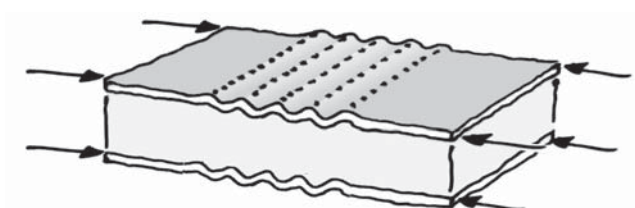


Bild 3.17: Knittern der druckbeanspruchten Deckschicht infolge unzureichenden Verbundes zwischen Kern und Deckschicht

3.2.2.3 Typische Instabilitäts- und Versagensformen

- Lokales und globales Beulen

Die Kernschicht hat in druckbeanspruchten Sandwichkonstruktionen ausschließlich stabilisierende Funktion. Sie verhindert lokales Beulen der Deckschichten bzw. Knicken des gesamten Tragelements. Die Platte beult nach dem Eulerschen Knickprinzip wie ein dünner Stab in Richtung der schwächsten Trägheit, bei der Platte folglich senkrecht zur Fläche. Der Stabilitätsbruch erfolgt in der Regel unsymmetrisch, aber auch symmetrisches Stabilitätsversagen durch Eindrücken oder Ablösen der Deckschichten ist möglich⁵ (Bild 3.15). Da die Deckschichten niemals absolut eben sind, ergeben sich bereits bei geringen Lasten Durchbiegungen quer zur Fläche, denen der Kern entgegenwirkt. In der Folge entstehen Zug- und Schubspannungen sowohl im Kern als auch in der Schichtfuge. Bleibt diese Gegenreaktion aus, beult die Deckschicht. Als meßbare Größe für diesen Fall ergibt sich nach [hin72] für die Grenzspannung σ_{beul}

$$(11) \quad \sigma_{\text{beul}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{G_{K,x} \cdot E_K \cdot E_D} \quad [\text{kN/cm}^2]$$

Werden die Materialsteifigkeiten G und E von Kern und Deckschicht im gleichen Verhältnis gesteigert, dann werden die durch die Belastungen hervorgerufenen Durchbiegungen kleinere Werte annehmen und die kritische Spannung im gleichen Verhältnis erhöht.⁶

- Ausermittiges Beulen

Aufgrund einer geringen Außermittigkeit der angreifenden Last weicht das Gefüge wie in Bild 3.16 gezeigt aufgrund der resultierenden Momentenbeanspruchung seitlich aus. Die Scherbeanspruchung führt dann zu Verformungen, wenn der Schubmodul der Kernschicht zu gering ist bzw. die Kerndicke zu klein ist.

- Knittern der Deckschichten

Weiterhin verhindert die Kernschicht das lokale Knittern der Deckschicht. Der Kern wirkt bis zu einem bestimmten Druckspannungsniveau wie eine stabilisierende Bettung der beulgefährdeten Deckschichten, die umso effektiver ist, je dichter der Verbund und je steifer die Kernschicht in z -Richtung ist. Gl. (12) zeigt sehr anschaulich die Wechselbeziehung von Kern- und Deckschicht bezüglich dieses Verformungsverhaltens:

5 [hin72]

6 [hin72] S.165

$$(12) \quad \sigma_{\max} = 2 \cdot E_D \cdot \left[\frac{t_D}{s} \right]^2 \quad [\text{kN/cm}^2]$$

Die kritische Grenzspannung σ_{\max} in der Deckschicht hängt zum einen von der Materialsteifigkeit E_D des Deckschichtmaterials ab. Die geometrische Situation spielt jedoch eine wesentlich größere Rolle: eine Reduzierung der Schichtdicke t_D der Deckschicht und zunehmende Abstände s der Zellwandungen des Kerns bewirken eine entsprechende Abnahme der Grenzspannung in den Deckschichten bzw. eine quadratische Zunahme des Knitterrisikos. Werden zum Beispiel Waben als Stützkern verwendet und ist die Zellengröße s der Waben im Vergleich zur Deckschichtdicke t_D sehr groß, dann beulen die Deckschichten bei Normalkraft-Belastung zwischen den Zellen ein und können damit ebenfalls einen Bruch durch lokales Beulen einleiten. Durch ein zu geringes Stabilitätsvermögen des Kerns kann der Bruch des Verbundelements also bereits eintreten, bevor die Werkstofffestigkeiten der Einzelkomponenten erreicht sind.

3.2.3 Beanspruchung auf Abscheren

Sandwichstrukturen können als Schubfeldkonstruktionen exzentrisch wirkende Kräfte in der Fläche aufnehmen und so als aussteifende Scheibenelemente verwendet werden. Die Sandwichplatte funktioniert dabei nach dem Tragprinzip des einfachen Rechteck-Schubfeldes⁷. Nach [kle05] ist die Platte dann wie in Bild 3.18 gezeigt seitlich an den Eckpunkten oder linear gelagert. Angenommen wird eine Einzellast P , die am äußeren auflagerparallelen Rand der Scheibe angreift. Es erzeugt eine konstante Querkraft im Sandwichgefüge, die der Einzellast P entspricht. Die exzentrische Lasteinleitung bewirkt gleichzeitig ein Kräftepaar M in der Fläche, dessen Schnittkräftepaar N_d/N_z Zugspannungen im unteren und Druckspannungen im oberen Plattenbereich hervorruft (Bild 3.19). Sämtliche Spannungen werden durch die Deckschichten abgetragen, der Kern übernimmt wie bei Druckbeanspruchung lediglich eine Stabilisierungsfunktion. Die Druckspannungen im oberen Bereich führen zu vergleichbaren Instabilitätsformen wie bei druckbeanspruchten Sandwichstrukturen. Besonders problematisch erweist sich örtliches Beulen der Deckschichten in den Bereichen größter Druckbeanspruchung am oberen Auflagerende (Bild 3.18) und führt bei unzureichender Stabilisierungsfunktion des Kerns zu globalen Beulverformungen.

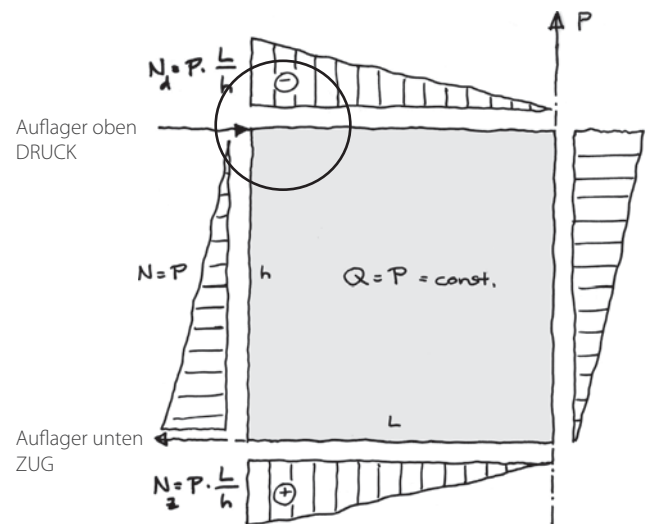


Bild 3.18: Tragprinzip des einfachen Rechteckschubfeldes (nach [kle05] S.159): Konstante Querkraft Q im Feld, Abtragung des Biegemomentes $P \times l$ über ein Kräftepaar N_d/N_z , Druckspannungsspitzen in der oberen Auflagerecke (Kreis)

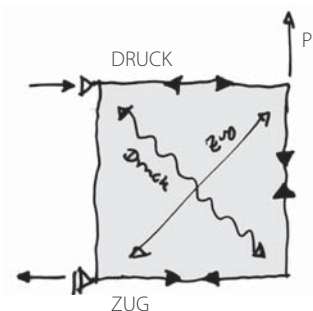


Bild 3.19: Idealisierte Darstellung der in der Scheibe wirkenden Schnitt- und Reaktionskräfte

3.3 Versuchsbeschreibung und Auswertung

3.3.1 Beschreibung der Versuchsdurchführung

3.3.1.1 Prüfkörperauswahl

Untersucht wurden in Analogie zur typologischen Einordnung aus Kapitel 2 folgende transluzenten Sandwichstrukturen auf Biegung, Druck und Abscheren. Je Versuchsart und Plattentyp wurde eine Versuchsreihe mit je drei identischen Prüfkörpern unter Verwendung der in Bild 3.20 aufgeführten Produkte durchgeführt.

3.3.1.2 Prinzipieller Versuchsablauf

Die Durchführung der Versuchsreihen sah folgenden Ablauf vor:

1. Je Plattentyp drei Prüfkörper herstellen (Zuschnitt)
2. Wiegen der Prüfkörper in Gramm
3. Nummerieren der Prüfkörper: Kurzprotokoll mit Angaben zu den Abmessungen, Werkstoffen, Gewicht, Versuchsnummer, Datum
4. Durchführung der Versuchsreihe
5. Prüfprotokoll mit Auswertung (siehe Anhang)

Bezeichnungsschema für den Einzelversuch:

B-03-1 B=Biegung, D=Druck, S=Schub
 03 = Nummer Plattentyp (hier; Mehrfachstegplatte S4P-32)
 1 = Nummer des Einzelversuchs

VN	Art	Dicke h	Deckschicht Dicke t_D	Stegweite a Zellenweite a	Breite b	Werkstoff Deckschicht/Kern	E-Modul Werkstoff*	Produkt	Hersteller
Stegplatten									
01	Hohlkammerplatte	16 mm	1,5 mm	32 mm	160 mm	PMMA schlagzäh	255 kN/cm ²	Resist SDP 16-32	Röhm
02	Hohlkammerplatte	16 mm	2 mm	64 mm	200 mm	PMMA	330 kN/cm ²	SDP 16-64	Röhm
03	Dreifachstegplatte	32 mm	1,5 mm	32 mm	160 mm	PMMA schlagzäh	235 kN/cm ²	Resist S4P-32	Röhm
04	Rautenstegplatte	32 mm	~ 1 mm	~ xx mm	150 mm	PC	230 kN/cm ²	Makrolon 5X/32-32	BayerSheetEurope
05	Wellenstegplatte	30 mm	1,5-2 mm	60 mm	190 mm	GFK	800 kN/cm ²	ILE	Scobalit
Wabenplatten									
06	Tubuswabenplatte	20 mm	1 mm	~ 7,5 mm	150 mm	PC	230 kN/cm ²	air board UV PC	Design Composite
07	3D-Wabenplatte	40 mm	2 mm	~ 25 mm	150 mm	PC	230 kN/cm ²	clear pep Stage UV PC	Design Composite

Bild 3.20: Überblick über die in den Versuchsreihen verwendeten Produkte und deren Bezeichnung als Prüfkörper, * nach Angabe Hersteller

3.3.1.3 Ermittlung, Aufbereitung und Weiterverarbeitung von Meßdaten

Sämtliche Versuchsreihen wurden 2006 und 2007 auf dem Zug-Druck Prüfstand im Labor des Fachgebiets Tragwerksentwurf und Konstruktionen, TU Kaiserslautern durchgeführt. Zur Aufbereitung der Meßwerte wurde das Vielstellen-Meßgerät „UGR 60“ der Firma HBM Hottinger Baldwin Meßtechnik Darmstadt verwendet. Die Weiterverarbeitung der Meßdaten erfolgte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm „Microsoft Excel 2000“ am Fachgebiet.

Um das Verformungs- und Bruchverhalten gezielt dokumentieren und bewerten zu können, wurden die Versuche mit Kraft-Wege-Intervall-Messung durchgeführt. Die Prüfmaschine erzeugt eine zeitintervall-abhängige Zielverformung in dem zu prüfenden Bauteil. Je nach Steifigkeit des Prüfmaterials ergibt sich eine entsprechend notwendige Kraft, die durch den hydraulischen Druckzylinder aufgebracht werden muss. Sie wird in gleichmäßigen Zeitintervallen bezugnehmend zum jeweiligem Weg gemessen. Die Wege-Zeit-Steuerung erfolgt linear und wird in mm/min angegeben. Neben der Aufnahme von Kraft-Wege-Daten als Grundlage zur Ermittlung von Steifigkeiten erfolgte die visuellen Aufzeichnung durch eine Videokamera. Unter Berücksichtigung des jeweiligen gemessenen Prüfkörpergewichts wurden ferner Aussagen zur Effizienz des jeweiligen Materials möglich.

3.3.1.4 Datenaufbereitung zur Ermittlung von Kennwerten

Es wurde eine je nach Versuchsverlauf abhängige Zahl an Kraft-Wege-Paaren aufgezeichnet, die in einem Kraft-Verformungsdiagramm grafisch dargestellt werden. Statische Kennwerte wie Steifigkeiten oder Festigkeiten lassen sich aus der linearen Wertekorrelation im elastischen Verformungsbereich ableiten, soweit diese verfügbar sind. Das Verhältnis zwischen Durchbiegung w und der Belastungskraft P ist hier annähernd konstant, die Wertepaare (w_i, P_i) bilden dann idealerweise eine Gerade. Da die gemessenen Werte jedoch im allgemeinen innerhalb eines gewissen Streubereiches liegen, wird die Lage dieser Geraden nach der Methode vom Minimum der Fehlerquadratsumme⁸ nach Gleichung (13) ermittelt. Daraus resultiert ein linearer Regressionskoeffizient, der die Stei-

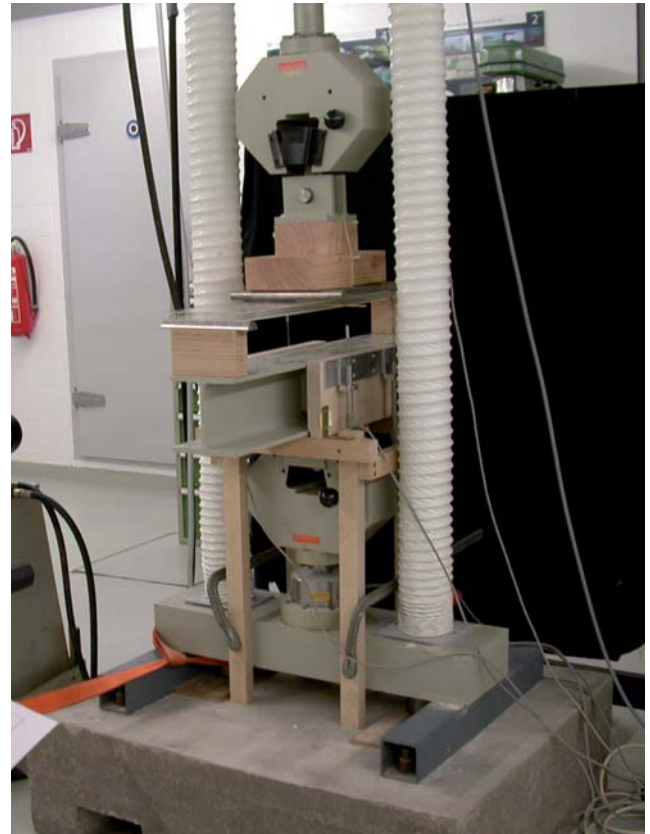


Bild 3.21: Prüfstand mit Aufbau für Biegeversuche

8 vgl. [chr71] S.50ff.

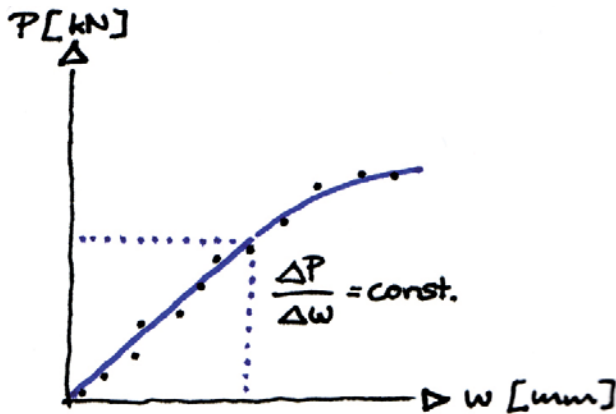


Bild 3.22: Mathematische Beschreibung des Steigungsgradienten
 $m = dP/dw$

gung der Gerade angibt und der in der Versuchsauswertung als Steigungsgradient m bezeichnet wird.

$$(13) \quad m = \frac{\sum (w_i - \bar{w}) \cdot (P_i - \bar{P})}{\sum (w_i - \bar{w})^2} \quad [\text{kN/cm}], \text{ wobei}$$

$$(14) \quad \bar{w} = \frac{\sum w_i}{n} \quad \text{und} \quad \bar{P} = \frac{\sum P_i}{n}$$

In den jeweiligen Versuchsreihen wird der Steigungsgradient m als Ausgangswert zur Bestimmung der statischen Kennwerte herangezogen (Bild 3.22).

3.3.1.5 Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Jeder Einzelversuch wurde mit drei Prüfkörpern durchgeführt. Alle Prüfkörper der jeweiligen Versuchreihe haben soweit möglich die gleichen Abmessungen. Unterschiedliche Strukturgeometrien der Platten wie z.B. differierende Stegabstände machen es notwendig, materialabhängig in der Breite abzuweichen. Die aus den Versuchen ermittelten Steifigkeiten werden daher auf eine Einheitsbreite von 1 m umgerechnet und dadurch besser vergleichbar.

3.3.2 Versuchsreihen - Biegung

Die Eignung als statisch wirksame Platte wurde im Vierpunkt-Biegeversuch in Anlehnung an EN ISO 178 und prEN 14509⁹ untersucht. Die Lasteinleitung erfolgte quer zur Fläche. Der Vierpunkt-Biegeversuch erzeugt zwischen den Drittelpunkten einen querkraftfreien Bereich mit konstantem Biegemoment. Folgende Aspekte wurden betrachtet:

- Biegesteifigkeit B als Gesamtsteifigkeit ($E \times I$)
- Verformungsverhalten des Gesamtgefüges
- Verhalten der Deckschichten als Druck- und Zugzonen, Dehn- und Drucksteifigkeit, Knittern
- Verhalten der Kernschicht als Schubfeld in den äußeren Balkendritteln, Beulverhalten der Kernwandungen
- Beanspruchung der Schicht- und Randfugen

- Versuchsaufbau

Die Prüfkörper werden als ebenes Tragwerk in Form eines Balkens der Abmessungen 800 x 150 mm mit einer Spannweite von 750 mm geprüft. Die Lagerung erfolgt

⁹ EN ISO 178 „Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften“; prEN 14509 „Selbsttragende Sandwich-Dämmelemente“

mit zwei Linienauflagern an den Enden. Die Linienauflager bestehen aus halben Vollstahlzylindern, die eine freie Verdrehung des Elements an den Auflagern zu ermöglichen. Die Lasteinleitung erfolgt in den Drittelpunkten des Elements durch Gelenkrollen, die an einer Lastverteilungstraverse aus Hartholz befestigt sind. Diese ist wiederum mittig am Druckzylinder fixiert und führt zu einem Erstkontakt mit dem Prüfkörper erst bei Versuchsdurchführung. So wird in den zu prüfenden, vergleichsweise weichen Prüfkörpern keine unkalkulierte Vorverformung erzeugt. Die Gelenkrollenbreite entspricht der Breite des Balkens. Die Messung der Verformung erfolgt durch zwei induktive Wegaufnehmer, die jeweils seitlich in der Mitte des Prüfkörpers hängend fixiert sind (Bild 3.23).

Die gewählte Anordnung ermöglicht eine differenzierte und eindeutige Zuordnung der Verformungserscheinungen in Bezug auf Querkraft und Biegung. Wie sich später zeigt, lassen sich gerade im Bereich des Kerns, der die Querkräfte zu den Auflagern durch Schub abträgt, entsprechende Beobachtungen in den einzelnen Balkendritteln der jeweiligen Schnittkraft zuordnen bzw. anschaulich machen. Gleichzeitig lässt sich zur Messung der Verformung in der Mitte der Prüflinge ein querkraftfreier, ebener Spannungszustand einstellen (Bild 3.24).

Der Druckzylinder wurde mit 5 mm/Minute bis maximal 50 mm gefahren. Als Wertepaare wurden in 5-Sekunden-Intervallen die Z-Verschiebung der zwei in Plattenmitte positionierten induktiven Wegaufnehmer (= Verformung w) und die durch die Prüfmaschine aufzubringende Kraft P in kN in der Meßdose des Druckzylinders aufgenommen (Bild 3.25).

- Ermittlung der Kennwerte

P ist die gemessene Gesamtkraft des Druckzylinders für die Zielverformung w , also ist die Einzelkomponente $P/2$. Für die Biegeverformung des untersuchten Tragsystems¹⁰ im linear-elastischen Bereich gilt unter Berücksichtigung der Gesamtkraft P :

$$(15) \quad w = k \cdot \frac{P}{B} \cdot l^3 \quad [\text{cm}]$$

wobei der dimensionslose Faktor $k = 23/1296$ (bzw. $0,5 \times 23/648$) für Lastangriff in den Drittelpunkten. Die Biegesteifigkeit B des Prüfkörpers errechnet sich dann unter Berücksichtigung des aus dem Lastverformungsdiagramm in (13) abgeleiteten Steigungsgradienten m mit

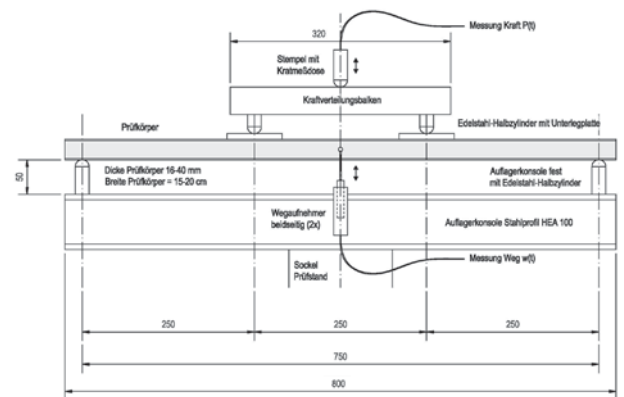


Bild 3.23: Vierpunktbiegeversuch: Versuchsaufbau in Anlehnung an DIN EN ISO 178 / prEN 14509

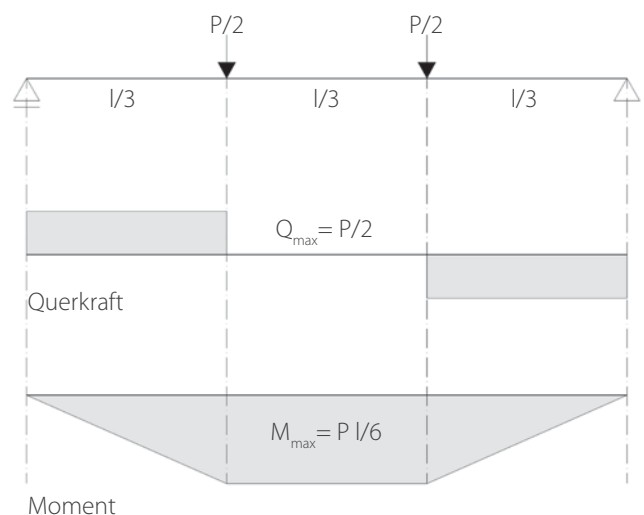
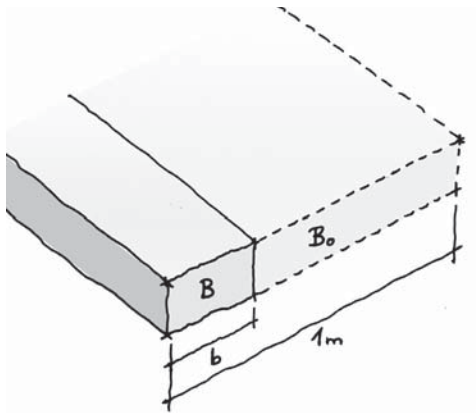
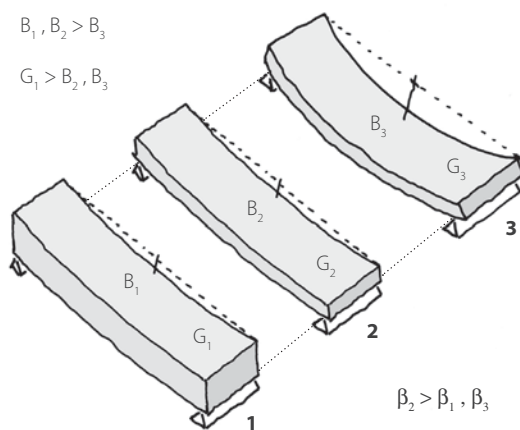


Bild 3.24: Vierpunktbiegeversuch: Tragsystem und Schnittgrößenverläufe für Querkraft Q und Moment M : im mittleren Balkendrittel beträgt die Querkraft = 0

P ist die Gesamtlast, l die Spannweite von Auflager zu Auflager



Bild 3.25: Versuchsaufbau des Vierpunkt-Biegeversuchs

Bild 3.26: Breitennormierte Steifigkeit B_0 bezogen auf 1 MeterBild 3.27: Relation zwischen Steifigkeit und Gewicht als Vergleichskennwert β für die Effizienz der Sandwichstruktur: In Platte 2 sind sowohl Steifigkeit als auch Gewicht größer bzw. gleich als bei den Platten 1 und 3, sie besitzt die größte Trageffizienz.

Durch Teilung von Gl. (2) durch die Gesamtverformung w_{ges} ergibt sich der Schubverformungsanteil, der in Folge als γ bezeichnet wird:

$$1 = \frac{w_s}{w_{\text{ges}}} + \frac{w_b}{w_{\text{ges}}} \Leftrightarrow \gamma = \frac{w_s}{w_{\text{ges}}} = 1 - \frac{w_b}{w_{\text{ges}}}$$

Der Biegeverformungsanteil lässt sich auch ausdrücken als Verhältnis zwischen der messbaren Gesamtsteifigkeit B und der Biegesteifigkeit $E I_y$, die sich bei allen Platten bestimmen bzw. schätzen lässt:

$$\frac{w_b}{w_{\text{ges}}} = \frac{P \cdot l^3 \cdot k \cdot B}{P \cdot l^3 \cdot k \cdot E \cdot I_y} = \frac{B}{E \cdot I_y}$$

Durch Einsetzen des Biegeverformungsanteils ergibt sich Gl. 19

Bild 3.28: Zur Bestimmung des Schubverformungsanteils in Gleichung (19)

$$(16) \quad B = m \cdot k \cdot l^3 \quad [\text{kNcm}^2]$$

Da die Schubverformung des Kerns in der gemessenen Verformung bereits enthalten ist, ergibt B nicht die aus dem reinen Biegeanteil resultierende Biegesteifigkeit sondern ist als Gesamtsteifigkeit zu interpretieren. Die reine Biegesteifigkeit ließe sich jetzt rechnerisch nach der Beziehung $B = E \times I$ ermitteln, was aufgrund der vielfach komplexen Kernstruktur nicht oder nur sehr ungenau erfolgen kann. Die Werte sind zudem nur beschränkt aussagefähig, da der E-Modul vom reinen Werkstoffwert häufig abweicht. Dies gilt vor allem für die Wabenplatten. In [sta74] wird gezeigt, dass sich bei indirekten Messungen an klassischen Metall-PU-Sandwichbalken für die E-Moduli um 20-50% höhere Werte als bei direkten Messungen ergeben. Dies liegt nach [sta74] unter anderem daran, dass im Inneren eines Sandwichbalkens größere Zwängungen als an herausgeschnittenen Kernschichtproben herrschen. Dies wirke sich versteifend und damit erhöhend für den E-Modul aus¹¹. Diese Tatsache lässt sich auch auf transluzente Sandwiche übertragen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Gesamtsteifigkeit B als statischen Kennwert zu verwenden.

Um die ermittelten Kennwerte der verschiedenen Materialien vergleichen zu können, werden Steifigkeit und Gewicht auf die Einheitsbreite von 1 m bezogen (Bild 3.26):

$$(17) \quad B_0 = \frac{B}{b} \quad [\text{Nm}^2/\text{m}]$$

Bezieht man das Gewicht des Prüfkörpers als Vergleichsparameter in die Betrachtungen mit ein, so lässt sich feststellen, dass ein Material umso effizienter ist, je steifer es in bezug zu seinem Gewicht ist. Zur analytischen Betrachtung wird ein Verhältniswert β eingeführt (Bild 3.27):

$$(18) \quad \beta = \frac{B_0}{G_0}$$

Lässt sich die reine Biegesteifigkeit aus der Querschnittsgeometrie rechnerisch ermitteln bzw. abschätzen (z.B. bei Stegplatten), ergibt sich für den Schubverformungsanteil γ in Anlehnung an (2) und (3) aus Bild 3.28:

$$(19) \quad \gamma = 1 - \frac{B}{E \cdot I_y} \quad [\%], \quad \begin{array}{l} B \text{ Gesamtsteifigkeit} \\ E \text{ Elastizitätsmodul Werkstoff} \\ I_y \text{ Trägheitsmoment Querschnitt} \end{array}$$

Der Wert gibt gleichzeitig die Schubverformung für die

11 [sta74] S.239f.

Last $dP = m \times dw$ ($dw=1\text{ cm}$) in cm an, was es ermöglicht, den Schubmodul G_x gemäß Gl. (6) zu bestimmen, wobei P/w mit m und γ ausgedrückt wird (siehe Protokoll):

$$(20) \quad G_x = \frac{m \cdot l}{6 \cdot \gamma \cdot d \cdot b} \quad [\text{kN/cm}^2]$$

3.3.2.1 Auswertung B01 / Hohlkammerplatte PMMA

Die Platte hält der Belastung ohne Bruchversagen stand. Zu beobachten ist ein nahezu linear-elastisches Verformungsverhalten, was auch das Lastverformungsdiagramm (Bild 3.30) bestätigt. Die maximale Durchbiegung von 50 mm wird ohne Bruch erreicht. Plastische Endverformungen konnten nach Versuchsende am Prüfkörper nicht festgestellt werden.

Die Stege zeigen Beultendenzen in den äußeren Balkendritteln im Bereich der Lasteinleitungspunkte. Die Deckschichten weisen aber mit 1,5 mm Stärke auch bei Erreichen der Maximalverformung kein lokales Knittern auf.

Die reine Biegesteifigkeit lässt sich als Produkt aus E und dem Trägheitsmoment I ermitteln und beträgt $430 \text{ Nm}^2/\text{m}$. Der Schubverformungsanteil beträgt demnach (19) etwa 11% und hält sich damit in Grenzen, was auf die geringe Gesamtdicke im Verhältnis zur Spannweite zurückzuführen ist.

Das schnelle Erreichen der Maximalverformung attestiert der Platte eine schlechte Eignung für tragende bzw. selbsttragende Anwendungen. Dies gründet hauptsächlich aus der Biegeweichheit des Deckschichtmaterials (vgl. Bild 3.09) und der relativ geringen Gesamtstärke der Platte.

Eine realistische Belastung wie zum Beispiel senkrecht auf die Fassade drückender Wind von 1 kN/m^2 würde unter Berücksichtigung der ermittelten Steifigkeitswerte bereits zu ca. $1/46$ Biegeverformung bezüglich der Spannweite führen, was ein sehr ungünstiges Verhältnis darstellt.

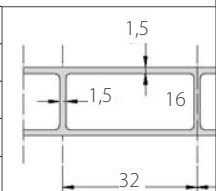
B01 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A10f.)		
Plattentyp	Hohlkammerplatte	
Produkt	Röhm Resist SDP 16/980-32	
Werkstoff	PMMA, schlagzäh modifiziert	
Gesamtdicke / Zellweite	16 mm / 32 mm	
Spannrichtung	stegparallel	
Gewicht G_0	3488 g	
Gesamtsteifigkeit B_0 (16)	$382 \text{ Nm}^2/\text{m}$	
Verhältnis $\beta = B_0/G_0$ (18)	1,1	
Schubanteil γ (19)	ca. 11%	

Bild 3.29: B01 - Versuchsdaten und Querschnittsabmessungen

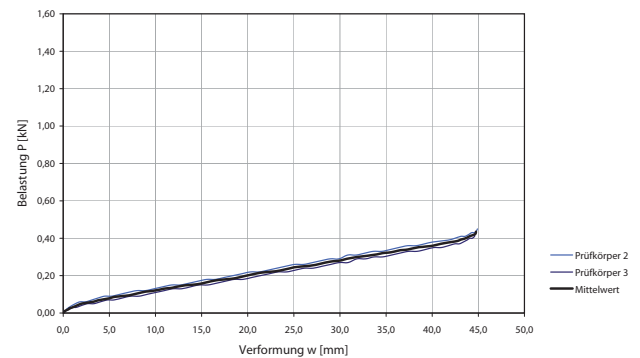


Bild 3.30: B01 -Lastverformungsdiagramm



Bild 3.31: Versuchsaufbau, Untersicht


B02 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A12f.)		
Plattentyp	Hohlkammerplatte	
Produkt	Röhm SDP 16/980-64	
Werkstoff	PMMA	
Gesamtdicke / Zellweite	16 mm / 64 mm	
Spannrichtung	stegparallel	
Gewicht G_0	4200 g	
Gesamtsteifigkeit B_0 (16)	645 Nm ² /m	
Verhältnis $\beta = B_0/G_0$ (18)	1,54	
Schubanteil γ (19)	ca. 4%	

Bild 3.32: B02 - Versuchsdaten und Querschnittsabmessungen

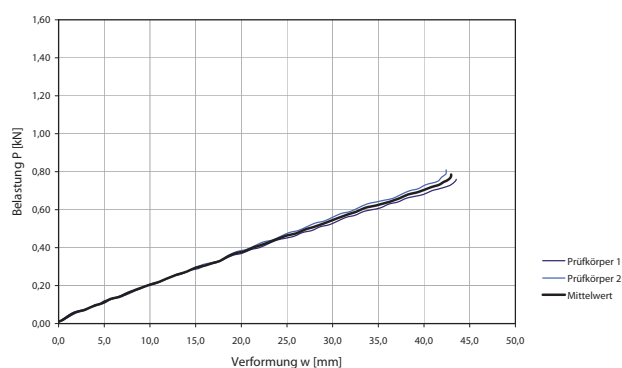


Bild 3.33: B02 - Lastverformungsdiagramm



Bild 3.34: Biegebeanspruchter Plattenstreifen mit 3 Hohlkammern



Bild 3.35: Biegelinie der Platte bei ca. 20 mm Gesamtverformung

3.3.2.2 Auswertung B02 / Hohlkammerplatte PMMA

Die Hohlkammerplatte weist im Vergleich zu B01 mit 64 mm einen doppelten Stegabstand auf. Die Deckschichten sind aber mit fast 2 mm Dicke wesentlich stärker und die Materialsteifigkeit ist mit 3300 MPa um ca. 30% größer als bei B01 mit Verwendung von schlagzähem PMMA.

Die Tragfähigkeit ist bis zum Erreichen der Maximalverformung gegeben. Wie Bild 3.33 zeigt, gleicht das Verformungsverhalten in etwa B01 und ist weitgehend linear. Die Maximalverformung von 50 mm wird jedoch erst unter einem etwa doppelt so hohen Lastniveau erreicht. Die Gesamtsteifigkeit ist entsprechend fast doppelt so hoch und ist zurückzuführen auf die dickeren Deckschichten und massiveren T-Knoten zwischen Stegen und Deckschicht. Beulen oder Knittern wurde nicht festgestellt. Die größeren Stegabstände werden offensichtlich durch die größeren Wandungsdicken und eine höhere Materialsteifigkeit mehr als ausgeglichen. Nach Rücknahme der Belastung verbleibt jedoch eine leichte Endverformung von ca. 2,5 mm in der Mitte der Platte. Es ist zu vermuten, dass sich die Deckschichten aufgrund ihrer vergleichsweise großen Dicke von 2 mm (zu 16 mm Plattengesamtdicke) am Querkrafttransport beteiligen.

Das würde auch den geringen Anteil der vernachlässigbaren Schubverformung mit ca. 4% erklären, was auch durch die im Protokoll (Anhang A12f.) ersichtliche Übereinstimmung der ermittelten Gesamtsteifigkeit mit der errechneten Steifigkeit nach Sandwichtheorie (nach Gl. 5) bestätigt wird.

Die Eignung als Tragelement ist wie bei B01 jedoch als ungünstig einzuschätzen, da die Platte vergleichsweise schlank ist und der Sandwicheffekt durch die geringe Materialsteifigkeit der PMMA-Deckschichten nicht wirklich genutzt werden kann.

3.3.2.3 Auswertung B03 / Mehrfachstegplatte PMMA

Die Mehrfachstegplatte wird bruchfrei bis zur Endverformung belastet. Es zeigt sich zu Beginn ein nahezu linear-elastisches Verformungsverhalten. Nach Rücknahme der Last verbleibt kurzzeitig eine Endverformung von 8 mm, die jedoch nach erneutem Messen eine Stunde später auf 0 absinkt.

Die Deckschichten und Stege halten der lokalen Lasteinleitung in den Drittelpunkten stand und werden nicht eingedrückt oder plastisch gestaucht. Die Kraft-Dehnungslinien der Einzelversuche weisen gemäß Bild 3.37 eine leichte, aber stetige Abflachung und zunehmende Streuung auf, was auf lokales Knittern der oberen, druckbeanspruchten PMMA-Deckschicht zurückzuführen ist. Diese Instabilität der Deckschicht ist im mittleren Plattendrittel, wo die aus dem Biegemoment resultierende Druckspannung am größten ist, besonders ausgeprägt. Mit weiterer Kraftzunahme stellt sich ein antimetrisches „Steppdecken“-Muster wie in Bild 3.38 ein, bei dem die Abstände von „Hoch zu Tiefpunkt“ sowohl quer als auch längs zur Spannrichtung in etwa dem Stegabstand entsprechen. Das Muster resultiert wie bei einem Profil aus einem örtlichen Beulen der Stege im Bereich der Druckzone, die als Lagerung der Deckschichten fungieren und so als Knotenlinie der Beulwellen wirken¹² (Bild 3.39). Da die Stege durch ihre eigene Verformung nicht starr sind, stellt sich eine Art gelenkige Stützung ein. Die obere Parallellage im Kern zeigt dieses Verhalten auch, jedoch in abgeschwächter Form. Das Knittern führt jedoch nicht zum Versagen der oberen Deckschicht, das antimetrische Verformungsmuster bildet sich bei Rücknahme der Kraft wieder vollständig zurück.

Die Platte besitzt aufgrund ihrer größeren Gesamtstärke eine höhere Steifigkeit als die Hohlkammerplatten. Die schlankeren Stege sind jedoch stärker beulgefährdet und fördern das Knittern der druckweichen Deckschichten. Die Parallellagen bringen keinen wesentlichen statisch-konstruktiven Mehrwert. Der Anteil der Schubverformung ist mit ca. 9% marginal. Eine realistische Belastung wie zum Beispiel senkrecht auf die Fassade drückender Wind von 1 kN/m² würde unter Berücksichtigung der ermittelten Steifigkeitswerte eine Verformung von ca. 1/120 bezüglich einer Spannweite von 1 Meter bedeuten. Für Fassadenanwendungen ist dieser Wert akzeptabel, für selbsttragende Anwendungen jedoch unbefriedigend.

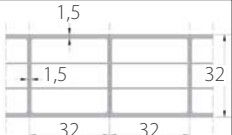
B03 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A14f.)		
Plattentyp	Mehrfachstegplatte	
Produkt	Röhm Resist S4P-32/32	
Werkstoff	PMMA, schlagzäh modifiziert	
Gesamtdicke / Zellweite	32 mm / 32 mm	
Spannrichtung	stegparallel	
Gewicht G_0	4606 g	
Gesamtsteifigkeit B_0 (16)	1516 Nm ² /m	
Verhältnis $\beta = B_0/G_0$ (18)	3,29	
Schubanteil γ (19)	ca. 9%	

Bild 3.36: B03 - Versuchsdaten und Querschnittsabmessungen

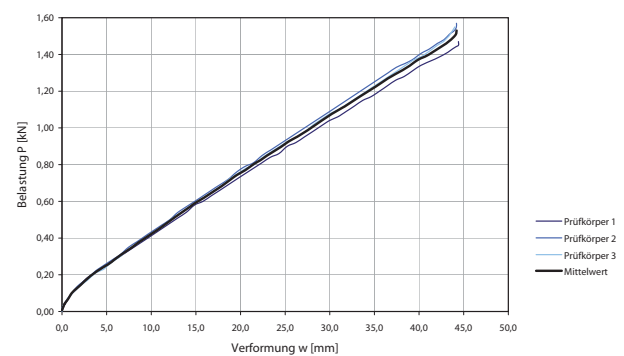


Bild 3.37: B02 - Lastverformungsdiagramm



Bild 3.38: Beulwellenmuster der oberen Deckschicht im mittleren, quer-kraftfreien Drittel

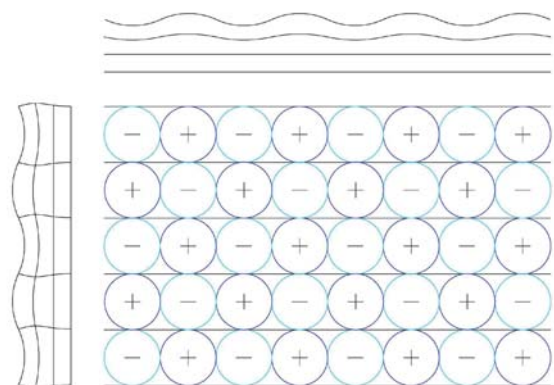


Bild 3.39: Antimetrisches Beulen der druckbeanspruchten Deckschicht: Hochpunkte (+) und Tiefpunkte (-) im Wechsel

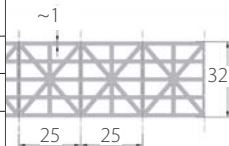
B04 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A16f.)		
Plattentyp	Multistegplatte	
Produkt	Makrolon 5X-32	
Werkstoff	PC, UV-stabilisiert	
Gesamtdicke / Zellweite	32 mm / 16 mm	
Spannrichtung	stegparallel	
Gewicht G_0	2893 g	
Gesamtsteifigkeit B_0 (16)	1004 Nm ² /m	
Verhältnis $\beta = B_0/G_0$ (18)	3,47	
Schubanteil γ (19)	ca. 13-16%	

Bild 3.40: B04 - Versuchsdaten und Querschnittsabmessungen

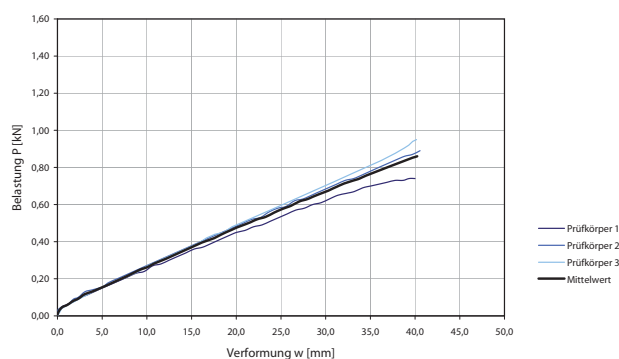


Bild 3.41: B04 - Lastverformungsdiagramm

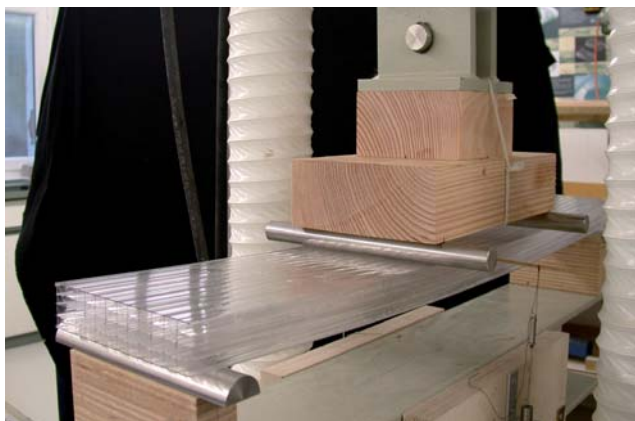


Bild 3.42: Versuchsanordnung mit 5X-32



Bild 3.43: Antimetrisches Knittern der druckbeanspruchten Deckschicht, Muster der Beulwelle entsprechend Versuch B03

3.3.2.4 Auswertung B04 / Multistegplatte PC

Die Deckschichten und Stege weisen alle vergleichbare Schichtdicken von 0,5 - 1 mm auf. Aufgrund der folienartigen Ausbildung streut das geometrische Profil relativ stark und lässt nur grobe Anhaltswerte zur Ermittlung von Vergleichskennwerten zu.

Auch hier lässt sich ein zu Beginn nahezu linearelastisches Verformungsverhalten mit späteren lokalen Instabilitäten feststellen. Die Platte konnte bruchfrei bis ca. 40 mm gefahren werden (Bild 3.41).

Ähnlich wie bei der PMMA-Mehrfachstegplatte stellt sich bereits ab 20 mm Biegeverformung in der obersten Lage eine Instabilität durch antimetrisches Knittern ein. Das Muster ist dem dichteren Stegabstand von 12 mm entsprechend feiner. Die Diagonalstege beulen örtlich im oberen Bereich der Druckzone.

Im unteren, mittigen Bereich der Zugzone ergibt sich ein leichtes wellenförmiges Stegbeulen, was daher rührt, dass die untere Deckschicht als Zugband in den dünnen Stegen Druckbeanspruchung ausübt und in diesen örtliches Beulen verursachen.

Ein Unterschied zu den drei zuvor geprüften Plattentypen besteht im Versagen der Lasteinleitungspunkte. Die Rollzylinder drücken an einer Seite bei ca. 40 mm Verformung durch die oberste Decklage, was zu einer Lastumlagerung führt. Die Platte versagt durch Abreißen der Stegenden von den Deckschichten in diesen Bereichen.

Die Diskrepanz zwischen ermittelter Gesamtsteifigkeit und geschätzter Biegesteifigkeit führt im linear-elastischen Bereich zu einem erhöhten Schubverformungsanteil von etwa 13%. Dies ist wohl vor allem auf die Dünnwandigkeit der Stege zurückzuführen.

Die Platte weist ihrer Morphologie entsprechend ein sehr geringes Gewicht auf. Es beträgt lediglich 9% eines Referenz-Vollprofils gleicher Außenabmessungen. Dies führt zu einem günstigen Verhältnis zwischen Steifigkeit und Gewicht. Das Tragvermögen ist jedoch als sehr begrenzt einzustufen. Unwesentlich erwies sich die weitergehende Untersuchung durch Variation der Spannrichtung. Die fachwerkartige Struktur der Stege bewirkt keine vergleichbare Tragwirkung quer zur Stegrichtung.

3.3.2.5 Auswertung B05 / Wellenstegplatte GFK

Aufgrund der größeren Querschnittsgeometrie wird die Platte breiter angesetzt. Die sehr materialreduzierte Querschnittsausbildung führt trotz eines fast doppelt so hohen spezifischen Gewichts von GFK mit 2 g/cm^3 sogar zu einem geringeren Flächengewicht als bei B03. Da der aus zwei trapezförmigen Stegen bestehende Querschnitt nicht axialsymmetrisch zur y-Achse ist, wurden die Platten jeweils von beiden Seiten getestet. In der ersten Versuchsreihe ist die Druckzone breiter, in der zweiten Versuchsreihe schmaler, aber mit höherem Schichtfugenanteil. Die ermittelten Steifigkeiten liegen im gleichen Bereich.

Nach einer linear-elastischen Anfangsverformung beginnt die druckbeanspruchte Deckschicht in der Mittelzone antimetrisch zu knittern. Bei etwa 1 kN reißen die schmalen druckbeanspruchten Randfugen der Oberseite in den Randdritteln nach und nach auf und führen zu einer Lastumlagerung in die Mitte, dessen Klebefuge nach einer Zeit ebenfalls beginnt, langsam aber stetig aufzureißen. Die sich ablösende Deckschicht wölbt sich weiter auf und fällt als Druckzone allmählich aus (Bild 3.46). Die Lastumlagerung bewirkt nun hohe Druckspannungen im Wellensteg, der aufgrund seiner schräggestellten Stege zusammengedrückt wird (Bild 3.47) und nicht mehr stabilisierend wirkt. Der ruckartige Bruch der Wellenstege seitlich des Lasteinleitungspunktes führt bei ca. 1,8 kN zum plötzlichen Versagen des Gesamtgefüges.

Die Versuchsreihe hat gezeigt, dass die Hauptschwachstelle der Platte die Klebefuge ist. Durch die spitzwinklige Anschlussgeometrie der Wellenstege an die Deckschichten und die relativ großen Abstände der Kontaktflächen ist die Platte für Kerbspannungen sehr empfindlich. Freie Ränder führen zu Ablöseerscheinungen, die sich auf benachbarte Schichtfugen ausbreiten. Die Stabilisierungsfunktion des Wellenstegs geht dadurch verloren und die Sprödigkeit des Materials führt zu einem plötzlichen Materialbruch. Die Verstärkung der freien Ränder durch eine Randleiste ist daher unabdingbar. Das GFK bewirkt unabhängig von der Schichtfugenproblematik eine gute Tragfähigkeit in der Fläche sowie eine hohe Steifigkeit, vor allem aufgrund der im Vergleich zu den Stegplatten aus PC und PMMA um drei- bis vierfach erhöhten Dehn- und Drucksteifigkeiten in den Deckschichtlagen. Die Referenzlast von 1 kN/m^2 bewirkt auf einem Meter unter Berücksichtigung der ermittelten Steifigkeitswerte eine Verformung von nur ca. $1/255$.

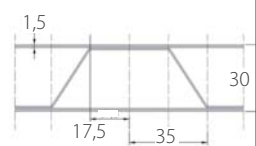
B05 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang S.18f.)		
Plattentyp	Wellenstegplatte	
Produkt	Scobalit ILE	
Werkstoff	GFK, 30% Glasfasern in Polyestermatrix	
Gesamtdicke / Zellweite	30 mm / 68 mm	
Spannrichtung	stegparallel	
Gewicht G_0	3929 g	
Gesamtsteifigkeit B_0 (16)	3329 Nm^2/m	
Verhältnis $\beta = B_0/G_0$ (18)	8,47	
Schubanteil γ (19)	?	



Bild 3.44: B05 - Versuchsdaten und Querschnittsabmessungen

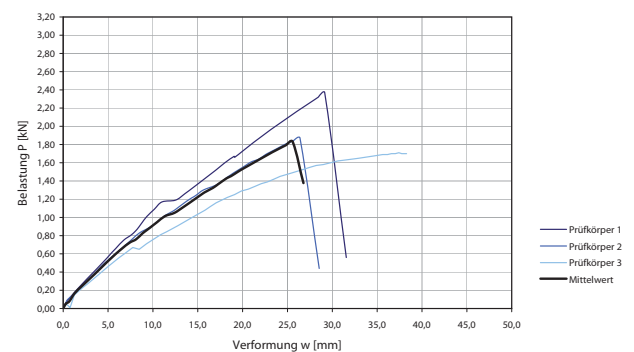


Bild 3.45: B05 - Lastverformungsdiagramm



Bild 3.46: Aufgerissene Schichtfugen führen zur Lastumlagerung und zum Zusammendrücken und Bruch des Wellenstegs



Bild 3.47: Antimetrisches Knittern der oberen Deckschicht in der Mittelzone, Zusammendrücken des Wellenstegs

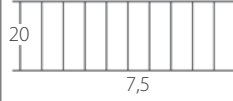
B06 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A20f.)		
Plattentyp	Tubuswabenplatte	
Produkt	DesignComposite Airboard UV-PC	
Werkstoff	PC, UV-stabilisiert	
Gesamtdicke / Zellweite	20 mm / 7,5 mm	
Spannrichtung	Waben in Reihe	
Gewicht G_0	2880 g	
Gesamtsteifigkeit B_0 (16)	379 Nm ² /m	
Verhältnis $\beta = B_0/G_0$ (18)	1,32	
Schubanteil γ (19)	ca. 8%	

Bild 3.48: Versuchsdaten

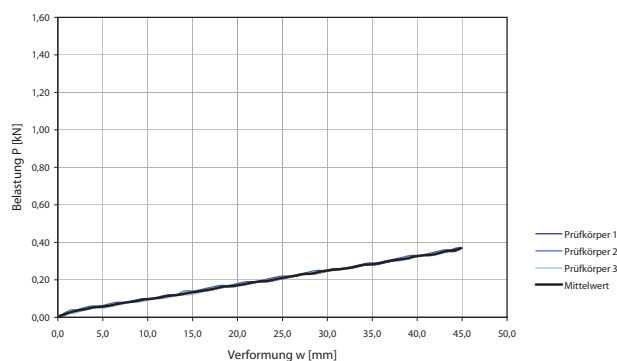


Bild 3.49: B06 - Lastverformungsdiagramm

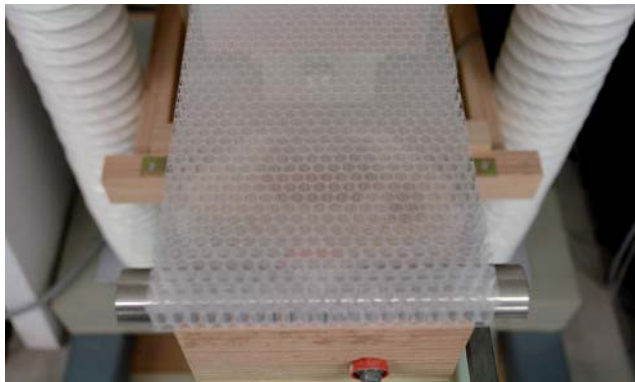


Bild 3.50: Aufsicht Plattenmorphologie



Bild 3.51: Homogene Biegelinie

3.3.2.6 Auswertung B06 / Tubuswabenplatte PC

Die Tubuswabenplatte trägt die Lasten bis zum Erreichen der Maximalverformung von 50 mm mit einem konstanten Kraft-Verformungszuwachs ab (Bild 3.49).

Die Zellwände der Zylinderröhren weisen alle vergleichbare Schichtdicken von ca. 0,5 mm auf. Trotz der folienartigen Ausbildung ist das geometrische Profil des Kerns sehr gleichmäßig und präzise. Es lässt im Gegensatz zu B04 eine verhältnismäßig zuverlässige Kennwertermittlung zu.

Der strukturierte Wabenkern aus PC-Tuben sorgt für ausreichend Stabilität. Instabilitätsformen sind nicht zu beobachten. Die geklebte Schichtfuge bleibt intakt. Die Schubverformung liegt mit ca. 8% im vernachlässigbaren Bereich, was unter anderem auf die geringe Dicke im Verhältnis zur Spannweite zurückzuführen ist. Die Kernschicht ist aufgrund der prismatischen Aufbaus in Z-Richtung sehr drucksteif, die Krafteinleitung führt im Gegensatz zu B04 nicht zum Eindringen der Rollzylinder in die dünnen, nur 1 mm dicken Deckschichten.

Die dichte Staffelung der Kernzellen ermöglichen im Verbund mit den Deckschichten ein effektives Tragverhalten ohne Instabilitätsformen trotz geringer Schichtdicken von unter 1 mm.

Der Plattentyp eignet sich gut zur Lastabtragung in Form von Biegung, der morphologische Aufbau entspricht der klassischen Sandwichbauweise. Die geringe Dehnsteifigkeit der dünnen Polycarbonat-Deckschichten und die verhältnismäßig kleine Plattendicke von 20 mm bewirkt die hohe Verformbarkeit des Gesamtgefüges und ermöglicht daher nur eine relativ geringe Gesamtsteifigkeit.

3.3.2.7 Auswertung B07 / 3D-Wabenplatte PC

Die 3D-Wabenplatte weist ein weitgehendes linear-elastisches Verhalten auf, auch bei fortgeschrittener Verformung. Die Kernschicht scheint die einwirkende Last gut umzuverteilen, die Wabe ist in Z-Richtung steif genug und widersteht den Lasteinleitungspunkten ohne lokale

Deformation. Die Maximalverformung von 50 mm wird ohne Bruch oder Instabilitäten bei einem hohen Lastniveau von ca. 3 kN erreicht.

Kurz vor Erreichen der Maximallast ist ein leichtes Knacken zu hören, was auf ein örtliches Anreißen einzelner Waben zurückzuführen ist. Das Last-Verformungsdiagramm (Bild 3.53) zeigt aber keine Unstetigkeiten in der Kurve, was bedeutet, dass selbst bei Ausfall von einzelnen Wabenwandungen die sofortige Umverteilung der Kräfte auf benachbarte Waben funktioniert. Knitter- oder örtliche Beuleffekte sind nicht zu beobachten, was auf den homogenen und dichten Verbund der Deckschichten mit der Kernschicht (vgl. Kapitel 2) zurückzuführen ist.

In den querkraftbeanspruchten Bereichen lässt sich gut die räumliche Tragwirkung der Kernschicht erkennen. In den Wabenwandungen bilden sich mit der Zeit Zugdiagonalen aus. Die Wandungen knittern als Parallelwelle, Wellentäler- und -kämme sind zu den Auflagern nach oben orientiert (Bild 3.55). Dieser örtliche Beuleffekt hat jedoch keinen Einfluss auf die Gesamtstabilität, rührt jedoch daher, dass die Wabenwandungen sehr geringe Stärken von unter 0,5 mm aufweisen und daher keine Druckbeanspruchungen aufnehmen können. Die vertikalen Kreuzungspunkte der Waben fungieren als Druckstreben und komplettieren die raumfachwerkartige Lastabtragung zu den Auflagern.

Die Rücknahme der Kraft bewirkt eine kurzzeitige bleibende Verformung von ca. 1 mm, die sich aber nach ca. einer halben Stunde wieder auf 0 zurückbildet. Kerbspannungen an den offenen Rändern sind unproblematisch einzustufen, die Kontaktflächen sind nach Belastung über die Fläche und auch in den offenen Randbereichen intakt. Es gibt keine Abschälerscheinungen wie in B05, sodaß aus statisch-konstruktiver Sicht randstabilisierende Maßnahmen nicht notwendig erscheinen.

Das statische Zusammenspiel zwischen Deckschicht und Kern funktioniert bei diesem Plattentyp sehr gut. Im Vergleich zu einer Vollplatte besitzt die Sandwichkonstruktion bei gleichen Außenabmessungen ca. 18% des Referenzgewichts. Das Verhältnis zwischen Gesamtsteifigkeit und Gewicht mit $\beta = 4,0$ ist im Vergleich zu den anderen Plattentypen als günstig einzuschätzen. Aufgrund der geringen Dehnsteifigkeit der Polycarbonat-Deckschichten scheint der Sandwicheffekt aber noch nicht effektiv genutzt.

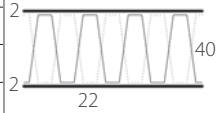
B07 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A22f.)		
Plattentyp	3D-Wabenplatte	
Produkt	DesignComposite clear pep stage UV-PC	
Werkstoff	PC, UV-stabilisiert	
Gesamtdicke / Zellweite	40 mm / 22 mm	
Spannrichtung	Waben in Reihe	
Gewicht G_0	7333 g	
Gesamtsteifigkeit B_0 (16)	3299 Nm ² /m	
Verhältnis $\beta = B_0/G_0$ (18)	4,00	
Schubanteil γ (19)	ca. 11%	

Bild 3.52: B07 - Versuchsdaten

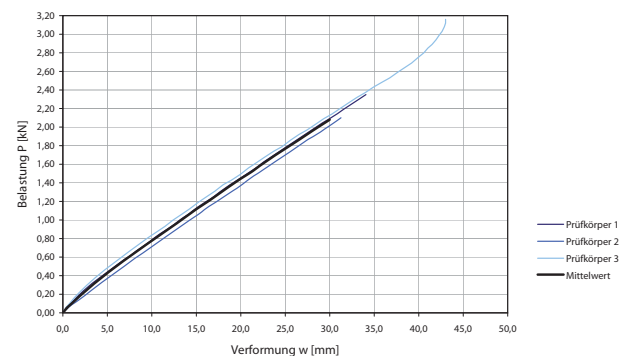


Bild 3.53: B07 - Lastverformungsdiagramm



Bild 3.54: Versuchsanordnung, Spannrichtung in Wabenreihe

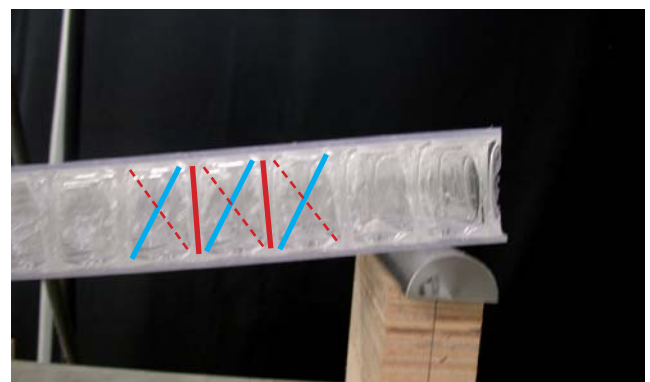


Bild 3.55: Querkrafttransport des Kerns: Raumfachwerkartiges Zusammenspiel der Wabenwandungen (blau=Zug, rot=Druck)

3.3.2.8 Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse

Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse		B01 Doppel-Steg	B02 Doppel-Steg	B03 Mehrfach-Steg	B04 Multi-Steg	B05 Wellen-steg	B06 Tubus-wabe	B07 3D-Wabe	Zeile Protokoll (Anhang)
Werkstoff		PMMA	PMMA	PMMA	PC	GFK	PC	PC	
Gesamtsteifigkeit B [kNcm²] m=dP/dw, k=23/1296	B = m k l³	611	1258	2426	1506	6990	568	4948	
Vergleichskennwerte Steifigkeit									
Steifigkeit pro Meter [Nm²/m]	B ₀ = B / b	382	645	1516	1004	3329	379	3299	4
Anteil Schubverformung ca. [%]	γ = 1 - B ₀ / E I _y	11%	4%	7%	13%	37%	8%	11%	5a
Errechnete Sandwichsteifigkeit [Nm²/m] nach Sandwichtheorie	B ₀ = E ₀ t ₀ d² / 2	490	647	1640	1105	4874	415	3321	6
Äquivalentes E-Modul E _{Äq} [kN/cm²]	E _{Äq} = B / I _y	112	189	56	37	148	57	62	7
Vergleich: Vollplatte [kN/cm²]	E (Werkstoff)	255	330	235	230	800	230	230	7a
Leichtbaukennzahlen									
Durchschnittsgewicht Versuchskörper [g]	absolut	558	819	737	434	825	432	1100	9
Vergleich: Vollplatte [g]		2458	2458	4915	4608	11088	2880	5760	9a
Gewichtsverhältnis [%]		23%	33%	15%	9%	7%	15%	19%	9b
Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	β = B / G	1,10	1,54	3,29	3,47	8,47	1,32	4,50	10
Vergleich: Vollplatte		0,51	0,73	2,09	2,04	3,41	0,80	3,19	10a

Bild 3.56: Statische Kennwerte - Plattentypen im Vergleich (vgl. Anhang A12-A23)

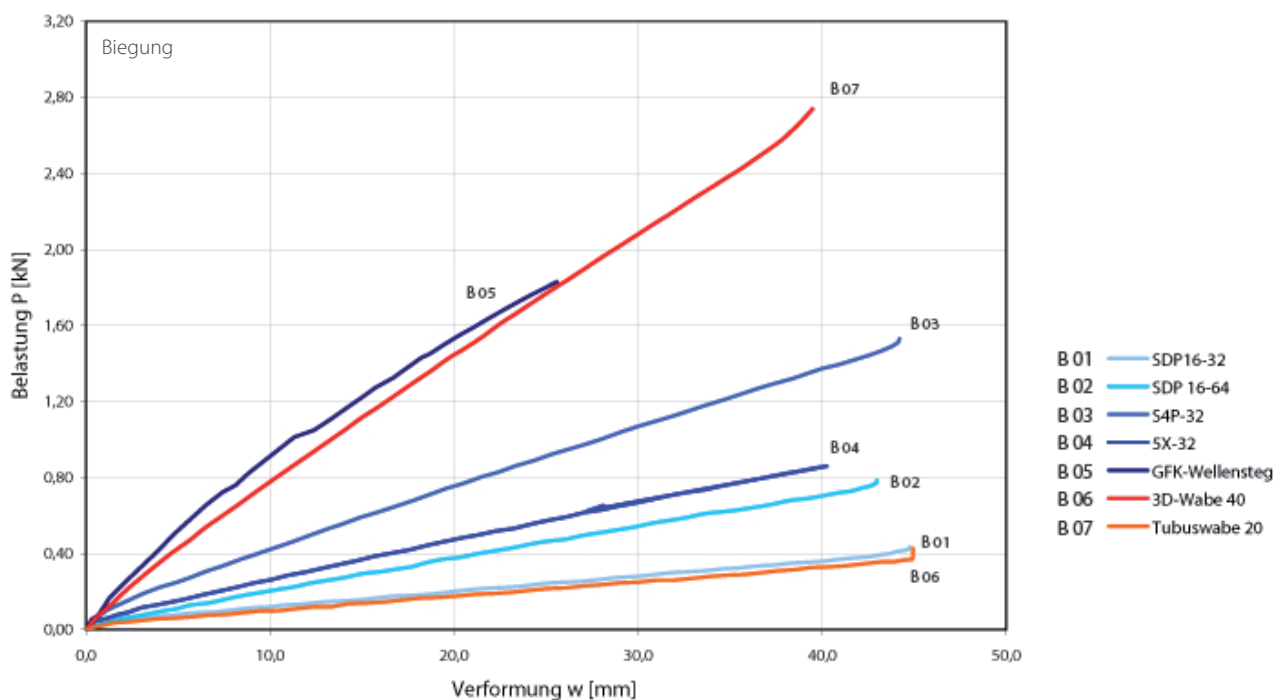


Bild 3.57: Lastverformungsdiagramm - Plattentypen im Vergleich

3.3.3 Versuchsreihen - Zentrischer Druck

Die Eignung als selbsttragende Scheibe wird durch einen zentrischen Druckversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 604 und prEN 14509¹³ untersucht. Hauptaugenmerk liegt auf dem Beulverhalten und der Interaktion zwischen Kern und Deckschicht. Die Lasteinleitung erfolgt längs zur Fläche gemäß S.75, Bild 3.13. Folgende Aspekte wurden betrachtet:

- Dehnsteifigkeit $D (E \times A)$
- Globales Verformungsverhalten des Elements
- Verhalten der Deckschichten zur Aufnahme der zentrischen Druckkraft
- Verhalten der Kernschicht als stabilisierende Schicht
- Beanspruchung der Schicht- und Randfugen

- Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist so konzipiert, dass die Druckkraft gleichmäßig und zentrisch in das Sandwichelement eingeleitet wird. Dazu werden zwei U-Profile aus Stahl an der Unterkante des Druckzylinders sowie am Sockel angeordnet. Der Prüfkörper hat jeweils eine Abmessung von 400x150 mm, wobei es wie bereits erwähnt geometriebedingte Abweichungen der Breiten bis zu 200 mm gibt. Aufgrund unterschiedlicher Prüfkörperdicken werden zur zentrischen Ausrichtung kleine Kanthölzer als Justierhilfen beidseitig angeordnet. Diese sind locker fixiert, sodass es nicht zu einer Einspannwirkung kommt. Nach Anfahren des Druckzylinders werden diese per Hand entfernt bzw. fallen von selber ab. Die Krafteinleitung geschieht über die ebenen Flansche der U-Profile direkt auf den vollen Querschnitt des Sandwichelements.

Die Messung der Verformung erfolgt durch einen induktiven Wegaufnehmer, der seitlich an der Lasteinleitungsstelle befestigt ist und somit die Verformung in Z-Richtung aufnimmt (Bild 3.58).

Die Kraft-Wege-Intervall-Messung erfolgt in gleichmäßigen Zeitintervallen, es wird für alle Druckversuche ein Messintervall von 5 Sekunden gewählt. Der Druckzylinder wird mit einer Geschwindigkeit von 2 mm pro Minute gefahren, der maximale Weg beträgt 20 mm. Bei jeder Messung werden die Z-Verschiebungen des induktiven Wegaufnehmers (= Verformung w in mm) und die durch

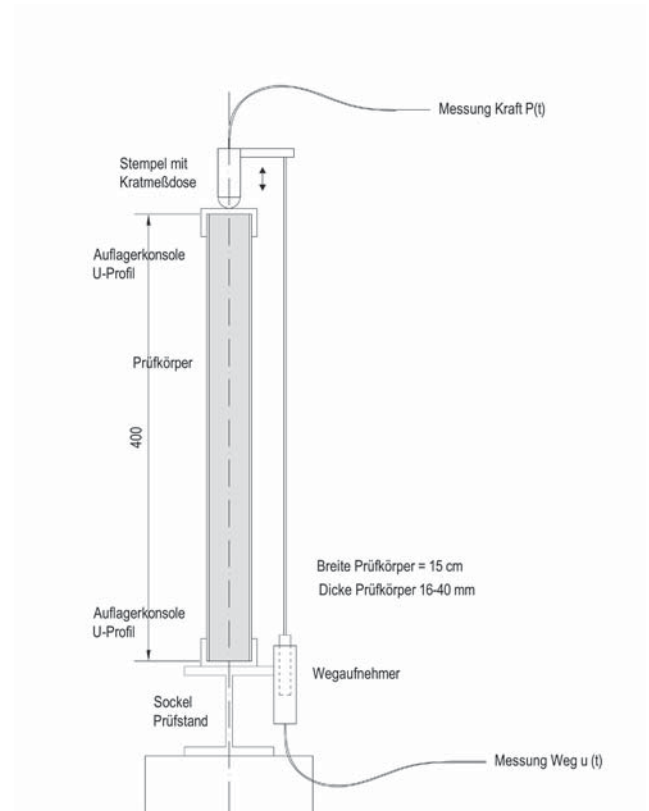


Bild 3.58: Versuchsaufbau Druck

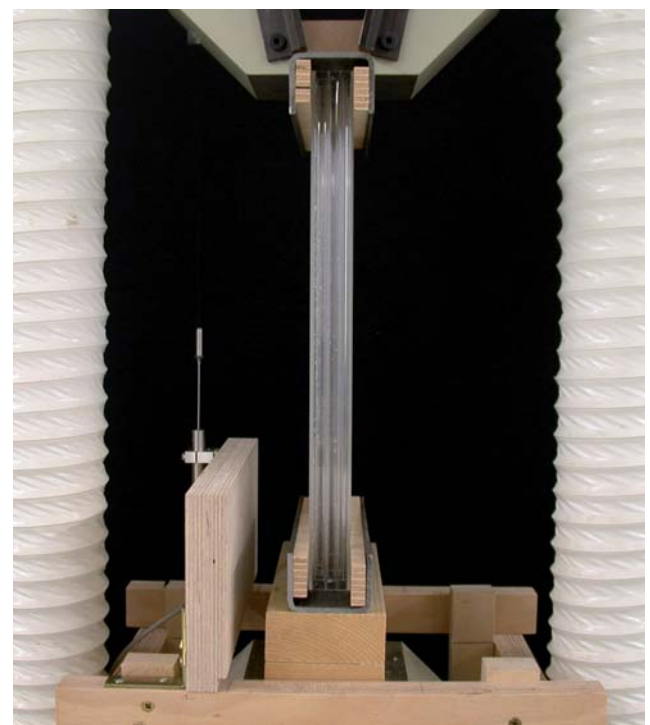


Bild 3.59: Umsetzung des Versuchsaufbaus in der Prüfmaschine

13 DIN EN ISO 604 „Kunststoffe – Bestimmung von Druckeigenschaften“; prEN14509 „Selbsttragende Sandwich-Dämmelemente“

die Prüfmachine aufgebrachte Druckkraft P in kN in der Messdose des Druckzylinders gemessen.

- Ermittlung der Kennwerte

Analog zu den Biegeversuchen werden Kraft-Wege-Wertepaare aufgezeichnet. Aufgrund der Positionierung des Messaufnehmers am Prüfgerät ist ein Wert hinreichend genau für die Auswertung. Zur Bestimmung des E-Moduls E bzw. der Dehnsteifigkeit $D = EA$ müssen die Werte der drei Einzelversuche im linear-elastischen Bereich aufbereitet werden. Es ergibt sich ein Kraft-/bzw. affines Spannungs-Dehnungsdiagramm. Die Stauchung ε ergibt sich nach Bild 3.60:

$$(21) \quad \varepsilon_i = \frac{w_i}{l} \quad [\%] \quad \begin{array}{l} w = \text{Stauchung} \\ l = \text{Knicklänge Prüfkörper} \end{array}$$

Es ergibt sich unter Berücksichtigung von Gl. (7) und (21):

$$(22) \quad D = \frac{P}{\varepsilon} = \frac{P}{w} \cdot l = m \cdot l \quad [\text{kNcm}^2/\text{cm}^2]$$

Analog zu den Biegeversuchen wird die Steifigkeit in Relation zum Gewicht des Prüfkörpers gesetzt:

$$(23) \quad \delta = \frac{D}{G}$$

Zur besseren Vergleichbarkeit werden die Werte breitenormiert ($b=1$ Meter) angegeben. Desweiteren wird analog zu den Biegeversuchen ein Vergleich zu Kennwerten der Sandwichtheorie gestellt. Die auf Grundlage der Meßdaten ermittelten Steifigkeitswerte aus (22) werden mit den theoretischen Werten aus (10) verglichen. Ist der aus dem Versuch ermittelte Steifigkeitswert aus (22) größer als der Wert nach Sandwichtheorie aus (10), ist zu vermuten, dass die Kernschicht sich am Normalkrafttransport beteiligt.

- Prüftechnische Besonderheiten

Die Beschränkung der Knicklänge auf 400 mm führt dazu, dass die Bauteile nicht zu schlank werden, um ein zu frühzeitiges plötzliches Ausbeulen bzw. Wegknicken der Elemente zu verhindern. Gleichzeitig wird das Belastungs- und Verformungsniveau größer und führt zu Vorgängen im Gefüge, die auch visuell erfassbar sind. Ein plötzliches Versagen bzw. eine dem Bruch gleichkommende Verformung wird dabei in Kauf genommen.

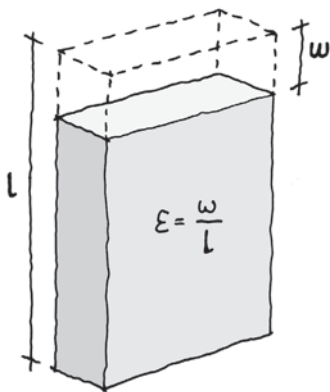


Bild 3.60: Definition der Stauchung ε

3.3.3.1 Auswertung D01 / Hohlkammerplatte PMMA

Wie das Lastverformungsdiagramm in Bild 3.61 zeigt, erfährt die Hohlkammerplatte bis etwa 0,5% Stauchung einen nur geringen Kraftzuwachs. Die Platte wird in diesem Bereich „in Position“ gedrückt, das Gefüge des Thermoplast PMMA komprimiert (a). Danach findet ein linearer Kraftzuwachs statt. Das Gefüge ist nun in der Lage, die Kräfte in einem nahezu linear-elastischen Spannungszustand aufzunehmen. Die Stege verhindern das Beulen der Deckschichten, aufgrund ihres Kontaktes mit der Lasteinleitungsstelle beteiligen sie sich außerdem am Kraftabtrag. Ab ca. 1,8% Stauchung beginnt die Platte in der Mitte zu einer Seite auszuweichen. Die Ausweichrichtungen waren in den drei Versuchen unterschiedlich. Die zur Stauchung notwendige Last nimmt stetig ab. Das Ausknicken der Platte bewirkt ein Biegemoment, das in der einen Deckschicht eine weitere Stauchung, auf der zur Ausweichrichtung orientierten Deckschicht eine Zugkomponente hervorruft. Die Kraftkonzentration führt zu einer plastischen Verformung. Bei ca. 2,6% (c) ist der mittlere Bereich aufgrund der plastischen Verformung soweit verfestigt, dass der weitere Kraftabfall geringer ausfällt.

Das PMMA wird durch die plastische Umformung trüblich weiß. Das charakteristische Bild der plastifizierten Deckschichten in der Mitte resultiert aus dem Bestreben der druckbeanspruchten Deckschicht, zu knittern, was aber durch die Stege verhindert wird. Die Stege zeigen genau in der Mitte ebenfalls Spuren plastischer Verformung durch örtliches Beulen. Es fällt auf, dass die sich einstellenden weißen Verformungstreifen um eine halbe Kammerbreite versetzt sind.

Die Maximalverformung von 20 mm bzw. 5% wird ohne Bruchversagen erreicht, was auf die Verwendung von schlagzähem PMMA zurückzuführen ist. Nach Wegnahme der Belastung relaxiert die Platte in den ebenen Zustand zurück, dieser wird jedoch nicht vollständig erreicht. Die plastifizierten Bereiche der Platte bleiben erhalten. Interessant erscheint das Instabilitätsverhalten der Platte. Das Knicken führt nicht zu einem plötzlichen Bruchversagen durch seitliches Ausschlagen der Platte, sondern die Verformung nimmt stetig weiter bei konstanten Kraftabfall zu. Der Lastabtrag ist reduziert, aber weiter gewährleistet. Die Stege sorgen auch nach Knicken der Platte für einen konstanten Abstand der Deckschichten, können aufgrund der geringen Plattenstärke und der „Weichheit“ des Werkstoffs (schlagzäh modifiziert) das globale Beulen aber nicht verhindern.

D01 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A24f.)	
Plattentyp	Hohlkammerplatte
Produkt	Röhm Resist SDP 16/980-32
Drucksteifigkeit D_0 (22)	7373 kN/m
Bruchkraft	12,4 kN
Verhältnis $\delta = D / G$	4,15

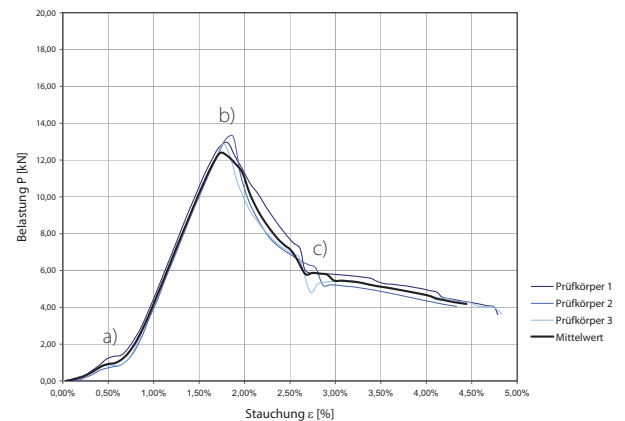


Bild 3.61: D01 - Versuchsdaten und Lastverformungsdiagramm



Bild 3.62: Seitliches Ausknicken des Gesamtgefüges, Plastifizierung der Deckschichten in der Mitte



Bild 3.63: Endverformung nach Wegnahme der Kraft: Eingetrübte Verformungstreifen (links), Lokale Beulverformung der Stege (rechts)

D02 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A26f.)	
Plattentyp	Hohlkammerplatte
Produkt	Röhm SDP 16/980-64
Drucksteifigkeit D_0 (22)	10321 kN/m
Bruchkraft	15,5 kN
Verhältnis $\delta = D / G$	3,81

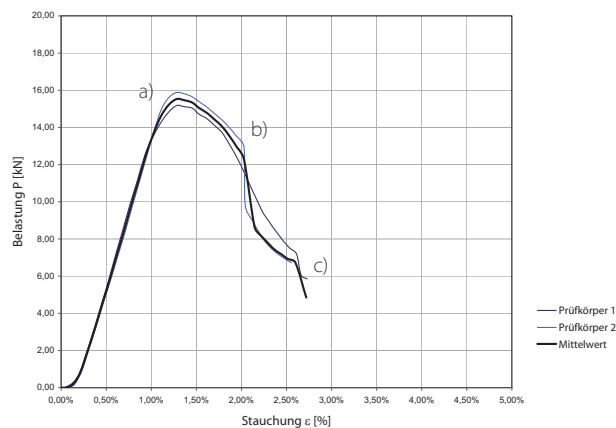


Bild 3.64: D02 - Versuchsdaten und Lastverformungsdiagramm



Bild 3.65: Versuchsanordnung

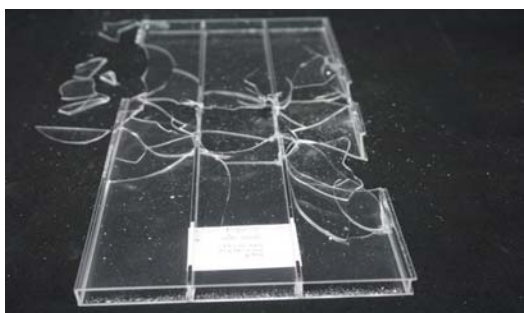
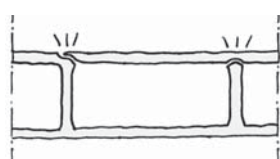


Bild 3.66: Bruchbild der Platte

Bild 3.67: Festgestellte Bruchgeometrien des angebrochenen 3. Prüfkörper:
Bruch Deckschicht (links), Bruch Steg (rechts)

3.3.3.2 Auswertung D02 / Hohlkammerplatte PMMA

Im Vergleich zu D01 fällt auf, dass der Druckkraft mehr absolute Querschnittsfläche entgegensteht, die Stege sich am Lastabtrag beteiligen. Die Drucksteifigkeit ist entsprechend höher, da die Deckschichten und Stege dicker sind, obwohl der Stegabstand mit 64 mm aber doppelt so groß ist.

Die Platte erreicht die Endverformung nicht, sondern versagt bruchartig durch asymmetrisches Beulen.

Die größeren Material- und Geometriesteifigkeiten der Platte bewirkt zunächst eine weitgehend linear-elastische Verformung mit höherem Tragvermögen (Bild 3.64). Ab etwa 1% Stauchung beginnt die Platte wie bei D01 langsam seitlich auszuweichen (a). Es stellt sich jedoch keine visuell erfahrbare plastische Verformung ein wie bei D01. Die Deckschichten auf der höher druckbeanspruchten Seite beginnen, aufgrund der größeren Stegabstände zu knittern.

Der Kraftabfall nimmt aufgrund der vorhandenen Instabilität weiter zu. Ab ca. 1,7% Stauchung fangen auch die Stege an, zwischen den Deckschichten zu beulen. Bei ca. 2% Stauchung (b) weist ein Knacken auf das Anbrechen der Schichtfuge auf der Zugseite hin, die Stege stanzen durch. Die Zugseite reißt mit stetigem Knacken weiter auf, bis die Scheibe durch plötzlichen Splitterbruch versagt und auch die Stege in der Mitte brechen (c).

Zur Begutachtung der Bruchgeometrie an den Kontaktstellen wurde der Versuch der dritten Platte kurz vor dem Bruch beendet. Wie Bild 3.66 zeigt, haben sich die Splitter vor allem aus den Deckschichten der Zugseite herausgelöst, als Hauptbruchstellen wurden die Kontaktstellen zwischen Deckschicht und Kernstegen lokalisiert. Bild 3.67 zeigt dessen Bruchgeometrie. Teilweise setzt sich die Bruchfuge in den Deckschichten fort (links), teilweise bricht der Steg stumpf ab (rechts). Aufgrund der beulbedingten Biegebeanspruchung stellen sich Spannungsspitzen in den steifen Kontaktstellen ein, die zum Aufreißen der Platte und schließlich zum plötzlichen Versagen des Gesamtgefüges führen.

Das festgestellte Instabilitätsverhalten ist auf die Schlankheit der Platte und die großen Stegabstände zurückzuführen. Die größere Querschnittsfläche zur Lastabtragung ermöglicht ein etwas höheres Tragvermögen als bei D01, der Spontanbruch durch seitliches Beulen wird durch die Stege zwar etwas verzögert, aber nicht verhindert.

3.3.3.3 Auswertung D03 / Mehrfachstegplatte PMMA

Es zeigt sich ein ähnlicher Verformungsverlauf wie bei D01. Der Kraftabfall durch asymmetrisches Beulen ist jedoch weniger stark ausgeprägt, da die aus dem Biegemoment der Beulverformung resultierenden Druck- und Zugspannungen in den Deckschichten aufgrund des größeren Hebelarms geringer sind (Bild 3.68).

Da die Platte aus schlagzäh modifiziertem PMMA besteht, führt die damit verbundene geringere Materialsteifigkeit (E) zu einer geringeren Drucksteifigkeit. Das Tragvermögen ist absolut gesehen jedoch höher, da die Instabilität durch seitliches Beulen erst bei 18,1 kN einsetzt. Die geringe Materialsteifigkeit wird folglich durch eine erhöhte geometrische Steifigkeit kompensiert.

Die Stabilisierung der Sandwichstruktur durch die Kernschicht ist aufgrund der größeren Gesamtdicke und durch die seitliche Stabilisierung der Stege durch die deckschichtparallelen Zwischenlagen wesentlich effektiver.

Ab 3% Stauchung weicht die Mitte der Platte zur Seite aus. Die Biegung erhöht einseitig die Druckspannung in der Deckschicht und führt analog zu D01 zur plastischen Verformung und Stauchung des Querschnitts. Plastisch umgeformte Bereiche sind als trübe Streifen erkennbar. Bei allen Einzelversuchen stellt sich das in Bild 3.69 und 3.70 gezeigte geometrische Muster ein, dass eine formale Analogie zur knitternden Deckschicht unter Biegebeanspruchung (B03) aufweist. Die Kammerabschnitte der Deckschicht werden jeweils um eine halbe Kammerbreite versetzt aufgewölbt bzw. eingedrückt.

Auch die Stege beulen trotz Stabilisierung durch die Parallellagen wellenförmig, und weisen im Bereich der Einschnürung ebenfalls plastische Verformungen auf.

Der Profilquerschnitt wird mit zunehmender Stauchung regelrecht abgekantet. Die plastischen Verformungen beschränken sich auf die Mitte, da hier die Verformungsenergie aus der Platte durch Plastifizierung des Werkstoffs kompensiert wird. Da die Platte aus schlagzähem PMMA besteht, versagt die Platte nicht durch Materialbruch wie in D02, sondern erreicht ähnlich wie bei D01 die Endverformung von 20 mm.

Nach Wegnahme der Kraft verbleibt die Endverformung im Prüfkörper. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse erscheint das Tragverhalten vor allem aufgrund des „weichen“ Werkstoffes „PMMA schlagzäh“ unbefriedigend, da ein linear-elastischer Lastabtrag nicht möglich erscheint.

D03 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A28f.)	
Plattentyp	Mehrfachstegplatte
Produkt	Röhm Resist S4P-32/980-32
Drucksteifigkeit D_0 (22)	5841 kN/m
Bruchkraft	18,1 kN
Verhältnis $\delta = D / G$	3,12

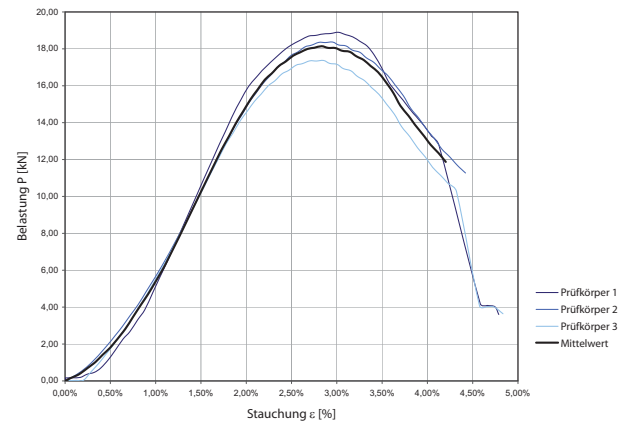


Bild 3.68: D03 - Versuchsdaten und Lastverformungsdiagramm

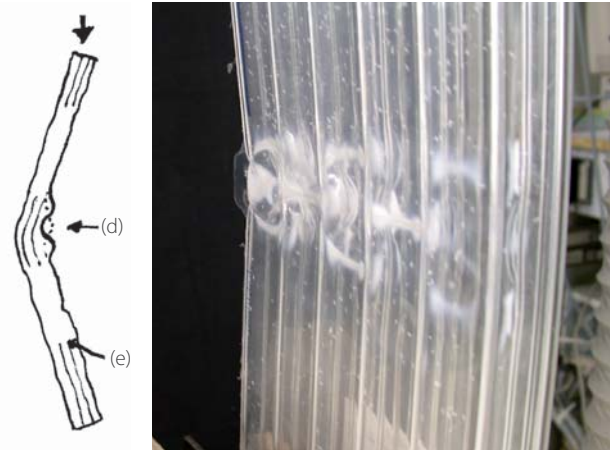


Bild 3.69: Asymmetrisches Beulen des Gesamtgefüges:

Plastische Stauchung der Deckschicht (d), Beulen der Stege durch Formänderung (e)



Bild 3.70: Beulverformung auf der gestauchten Plattenseite:

Die plastifizierten Bereiche sind als weiße Streifen sichtbar

D04 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A30f.)	
Plattentyp	Multistegplatte
Produkt	Makrolon 5X-32
Drucksteifigkeit D_0 (22)	5841 kN/m
Maximale Kraft	12,8 kN
Verhältnis $\delta = D / G$	4,15

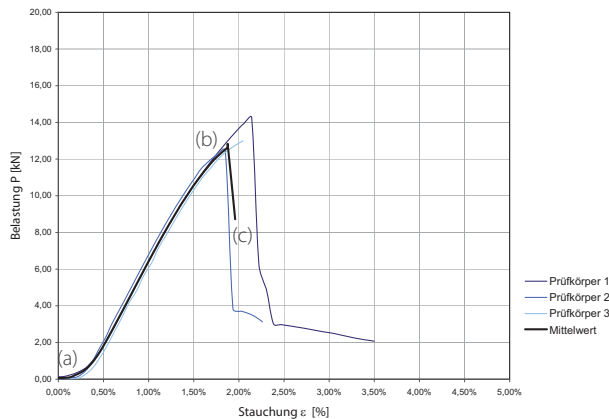
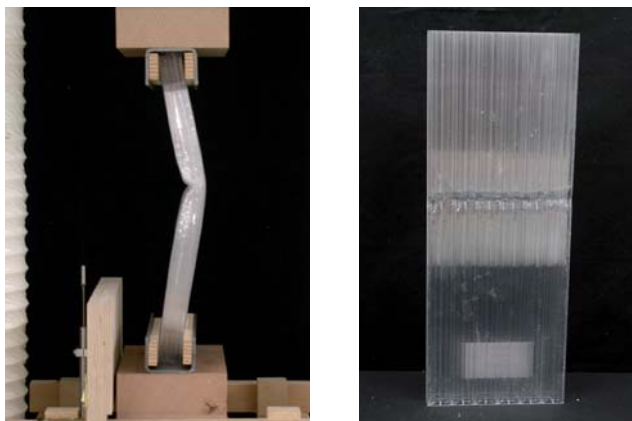


Bild 3.71: D04 - Versuchsdaten und Lastverformungsdiagramm

Bild 3.72: Knittern der Deckschichten (links)
Plötzliches Ausknicken der Platte (rechts)Bild 3.73: Einschnüren der druckbeanspruchten Seite beim Knicken (links)
Bleibende Verformung nach Abschluss des Versuchs (rechts)

3.3.3.4 Auswertung D04 / Multistegplatte PC

Die Platte besteht aus Polycarbonat und weist eine ähnliche Materialsteifigkeit wie schlagzähes PMMA der Plattentypen D01 und D03 auf. Die einheitlichen, folienartigen Steg- und Deckschichtstärken von 0,5 - 1 mm und die dichte Anordnung der Stege zueinander kennzeichnen die Lastabtragung über die gesamte Querschnittsfläche, nicht nur alleine über die Deckschichten.

Ähnlich wie bei den anderen Stegplatten zeigt die Kraft-Dehnungskurve in Bild 3.71 einen stabilen Lastabtrag nach anfänglicher Kompaktierung des Werkstoffs (a) mit weitgehend linearer Kraftzunahme. Ab ca. 1,3% Stauchung beginnen die sehr dünnen Deckschichten bereits zu knittern. Es stellt sich das charakteristische, versetzte Knitterbild aus D01 bzw. D03 ein, wenn auch in kleinerem Maßstab. Im Gegensatz zu D01 und D03 knittern die Deckschichten jedoch beidseitig über die gesamte Höhe des Prüfkörpers (Bild 3.72) und nicht nur in der Mitte. Ein weiterer wesentlicher Unterschied besteht darin, dass der Knittereffekt der asymmetrischen Beulverformung der Platte vorausgeht, was auf das geringe Verhältnis zwischen Deckschichtdicke und Stegabstand zurückzuführen ist. Die Stabilisierungsfunktion der Kernschicht ist dennoch gegeben, die Stege stabilisieren sich gegenseitig und neigen nicht zum Beulen. Die Platte knickt bei ca. 2% Stauchung und einer Knicklast von ca. 12,8 kN (b) plötzlich zur Seite weg, bricht jedoch nicht (Bild 3.73). Durch das Ausknicken sinkt die Kraft schlagartig um ca. 50% (c). Die Platte verharrt zunächst in ihrer Instabilität und wird mit stetig abnehmender Last weiter zur Seite gedrückt, bis bei 20% der Maximalkraft die Endverformung erreicht ist.

Nach Wegnahme der Last relaxiert die Platte in ihren Ursprungszustand zurück, es verbleibt eine plastische Stauchung in der äußersten Kammerlage der gestauchten Seite (Bild 3.73). Trotz der geringeren absoluten Querschnittsfläche entspricht der äquivalente E-Modul in etwa dem Wert von D03. Die Kontaktzonen zwischen Stegen und Deckschichten sind wesentlich biegeweicher, die foliengleichen Deckschichten plastifizieren daher nicht wie in D01 und D03, sondern beulen bzw. knittern sofort. Aufgrund der starken Neigung der Deckschichten zum Knittern ist die Eignung als Druckelement aufgrund des „weichen“ Werkstoffs PC und der geringen Schichtdicken als unbefriedigend zu bezeichnen, da ein linear-elastischer Lastabtrag nicht gegeben ist.

3.3.3.5 Auswertung D05 / Wellenstegplatte GFK

Die Platte weist aufgrund der Verwendung von GFK eine mehr als dreifach höhere Drucksteifigkeit als bei D03 oder D04 auf. Die Stauchungen sind bei gleichzeitig höherem Lastniveau wesentlich geringer. Der Wellensteg wird als profiltreuer Bestandteil des Plattenquerschnitts zum Lastabtrag mit herangezogen. Wie Bild 3.74 zeigt, ist die Kraft-Verformungslinie anfänglich relativ steil und lässt auf eine zunächst gute Stabilisierung durch den Wellensteg aufgrund des flächigen Verbundes mit den Deckschichten und der erhöhten Materialsteifigkeit schließen.

Ab ca. 0,8% Stauchung und 20 kN Last stellt sich eine Instabilitätsform ein, die Steigung der Kraft-Verformungslinie nimmt aber geringfügig ab. Die GFK-Deckschichten beginnen zu knittern, mit weiterer Kraftzunahme stellt sich das charakteristische Knitterbild mit versetzten Wölbzonen in benachbarten Kammern ein. Die großen Stegabstände von 68 mm bewirken einer relativ große Amplitude der Beulwelle, besonders in den seitlichen Randbereichen der Platte. Die extreme Instabilität der Deckschichten führt offensichtlich zu einer Lastumlagerung auf den Wellensteg, der bei ca. 1% Stauchung ebenfalls beginnt, örtlich zu beulen.

Aufgrund der resultierenden Kerbspannungen in den breiten Schichtfugen beginnen sich die Deckschichten in der Mitte von den Fugenrändern ausgehend vom Wellensteg abzulösen. Der beidseitig festzustellende Abschälprozess setzt sich langsam aber stetig zu den Auflagern hin fort. Bei ca. 1,2% Stauchung versagt die Platte durch symmetrisches Beulen (Bild 3.75). Die Deckschichten wölben sich schlagartig auf, brechen jedoch nicht. Durch den kurzzeitigen Lastzuwachs bricht jedoch der Wellensteg in der Mitte vollständig durch (Bild 3.76).

Die Knitteranfälligkeit der Deckschichten aufgrund der großen Stegabstände leitet das Aufbrechen der Schichtfuge ein. Die Sprödigkeit des Glasfasermaterials führt zum ruckartigen Versagen der Platte. Interessant erscheint, dass die Platte im Gegensatz zu den PC/PMMA-Stegplatten symmetrisch beult und sofort versagt. Wie bei den Biegeversuchen bereits gezeigt, stellt auch hier die geklebte Schichtfuge die statisch-konstruktive Schwachstelle dar. Zudem scheint die Stabilisierungswirkung des Wellenstegs aufgrund seiner Schrägstellung zu den Deckschichten und seiner Schlankheit eingeschränkt.

D05 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A32f)	
Plattentyp	Wellenstegplatte GFK
Produkt	ILE 30 mm
Drucksteifigkeit D_0 (22)	16595 kN/m
Maximale Kraft	31,3 kN
Verhältnis $\delta = D/G$	7,58

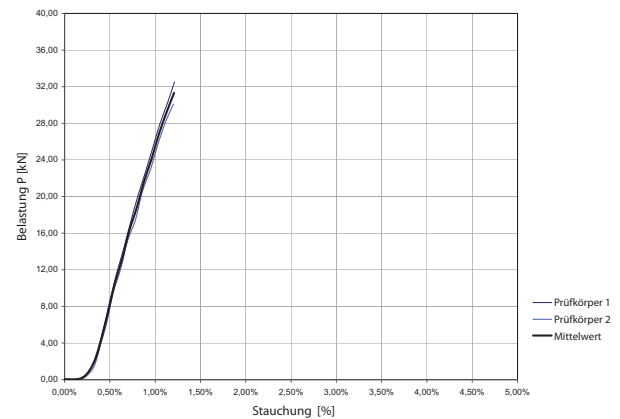


Bild 3.74: D05 - Versuchsdaten und Lastverformungsdiagramm

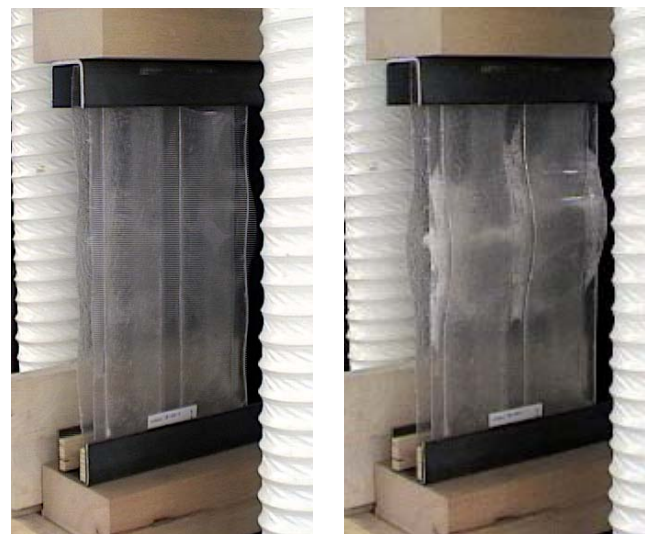


Bild 3.75: Knittern der Deckschichten kurz vor dem Bruch (links)
Symmetrisches Beulen der Platte und Bruch (rechts)



Bild 3.76: Bauteilanalyse nach Bruchversagen: Wellensteg mittig durchgerissen, Kontaktflächen im mittleren Bereich beidseitig gelöst

D06 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll im Anhang A34f.)	
Plattentyp	Tubuswabenplatte PC
Produkt	Air Board UV PC 20
Drucksteifigkeit D_0 (22)	4607 kN/m
Maximale Kraft	9,6 kN
Verhältnis $\delta = D / G$	3,07

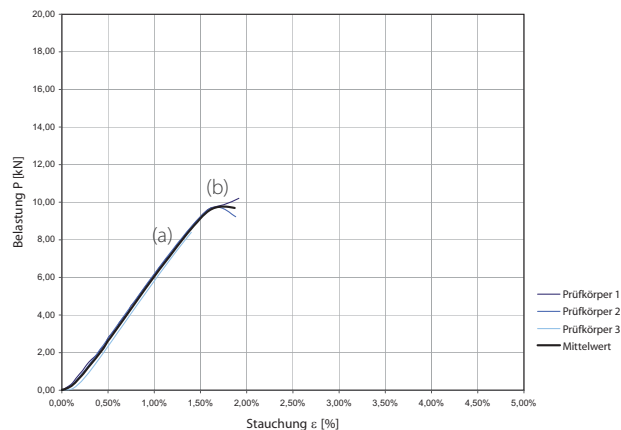


Bild 3.77: D06 - Versuchsdaten und Lastverformungsdiagramm

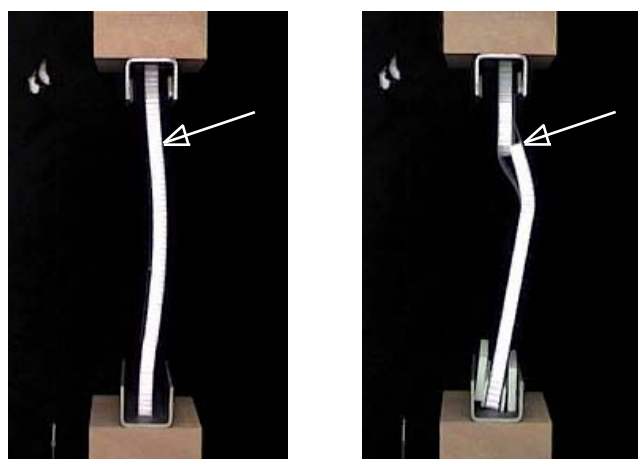
Bild 3.78: Asymmetrisches Beulen (links)
Kernbruch nach Ablösen Deckschicht im oberen Viertel (rechts)

Bild 3.79: Ablösen der Deckschichten im unteren Viertel, vor Kernbruch

3.3.3.6 Auswertung D06 / Tubuswabenplatte PC

Das Lastverformungsdiagramm in Bild 3.77 zeigt einen nahezu linear-elastischen Verformungsverlauf. Die homogene Kernschicht hindert die dünnen Deckschichten, örtlich zu beulen und gewährleistet damit die Gesamtstabilität der Platte bis etwa 1,3% Stauchung bei einer notwendigen Last von 8 kN (a).

Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Platte langsam seitlich auszuweichen. Wie auf Bild 3.78 zu erkennen ist, entspricht die Biegelinie in etwa dem Eulerfall 4, es stellt sich eine Art Einspannung im Bereich der Auflager ein. Diese resultiert nicht aus den versuchstechnischen Einspannvorgaben (die Positionsklötze werden nach Lastangriff entfernt), sondern stellt sich unter Belastung von selbst ein. Auflagerfläche und Reibung scheinen ausreichend groß zu sein, dass die Platte an den Auflagern nicht verrutscht.

Die asymmetrische Beulverformung nimmt stetig zu, bei etwa 9,6 kN Last löst sich die Deckschicht schlagartig von der Kernschicht (b). Dies geschieht zuerst auf der druckbeanspruchten Seite oberhalb des Wendepunktes der Biegelinie (Pfeile in Bild 3.78). Die Ablösung bewirkt ein Aufheben des Kräftepaargleichgewichtes aus der Momentenbeanspruchung und ein Ablösen der Deckschicht auf der anderen Seite der Platte. Die resultierende Schubbeanspruchung in Querrichtung führt zu Spannungsspitzen in der Kernschicht, die in der Folge über die gesamte Länge bricht.

Nach Wegnahme der Belastung zeigt sich, dass die Schichtfuge auf ca. 60% der Fläche aufgerissen ist. Die Deckschichten sind beidseits großflächig abgelöst.

Der Plattentyp zeigt grundsätzlich, dass für den Lastabtrag der Sandwicheffekt genutzt wird und eine Last von ca. 8 kN von 1 mm dicken, von einem prismatischen Kern stabilisierten Deckschichten aufgenommen werden kann. Die globale Instabilität ist vor allem auf die Schlankheit der Platte sowie die unzureichende Dehnsteifigkeit der Deckschichten zurückzuführen. Einen weiteren Schwachpunkt stellt die Klebefuge dar. Die Kontaktflächen zwischen den dünnen Zylinderwaben und der Deckschicht sind sehr filigran und daher sehr empfindlich gegen abschälende Kräfte, welche letztendlich zum Kollabieren der Platte geführt haben.

3.3.3.7 Auswertung D07 / 3D-Wabenplatte PC

Die Platte zeigt in Bild 3.80 bis ca. 2% (a) ein nahezu linear-elastisches Verformungsverhalten. Es ist kein Knittern der Deckschichten oder Beulen des Gesamtgefüges festzustellen. Im Gegensatz zu den Stegplatten wird die Kernschicht nicht direkt am Lastabtrag beteiligt. Die Drucksteifigkeit ist im Vergleich zu D01 und D03 (etwa gleiche Querschnittsfläche, mit Stegen) aber um ca. 50% höher. Bei weiterer Stauchung zeigt die Platte ein ähnliches Verhalten wie die Tubuswabenplatte D06 (b). Kurze Zeit später versagt die Platte schlagartig durch asymmetrisches Beulen (c). Die Kernschicht bricht jedoch nicht durch, es verbleibt aber eine plastische Verformung nach Wegnahme der Last (Bild 3.82). Es fällt auf, dass die festgestellte Instabilität bei allen 3 Prüfkörpern nicht in der Mitte der Platte, sondern wie bei D06 in den Viertelpunkten stattfindet. Die seitliche Auslenkung der Platte fällt aber aufgrund der größeren Plattendicke sehr viel geringer aus.

Der Plattentyp zeigt bis kurz vor dem Stabilitätsversagen ein günstiges Verformungsverhalten. Die dicht gestaffelte Kernschicht und dessen strukturbedingte hohe Querstabilität sorgt für eine gute Stabilisierung der druckbeanspruchten Deckschichten und verhindert örtliche Instabilitäten wie Knittern oder Beulen. Die plötzliche Beulverformung ist vermutlich auf die begrenzte Schubsteifigkeit der Kernschicht zurückzuführen (vgl. 5.76). Diese Annahme bestätigt sich in der Untersuchung der verformten Kernschicht (Bild 3.82). Durch das anfängliche Ausweichen der Platte beginnen die foliengleichen Wabenwandungen der Kernschicht örtlich zu knittern und sich zu verschieben, was gleichzeitig die Quersteifigkeit mindert. Der Kern kann die Stabilisierung nicht mehr aufrecht erhalten, die Platte versagt.

Die geklebte Schichtfuge zwischen Deckschicht und Kern ist gänzlich unbeschädigt, selbst im Bereich der Verformung scheint die Klebefuge nach visueller Untersuchung noch intakt. Der Plattentyp weist trotz geringster Werkstoffsteifigkeit (Polycarbonat) die höchste Maximalkraft auf. Diese Tatsache bestätigt die effektive statisch-konstruktive Wechselwirkung zwischen Deckschicht und Kern. Vor dem Hintergrund des vorhandenen statisch-konstruktiven Potentials erscheint aber die Stauchung der Platte aufgrund der geringen Dehnsteifigkeiten des Deckschichtmaterials als zu hoch.

D07 - Versuchsdaten (Versuchsprotokoll in Anhang A36f.)	
Plattentyp	3D-Wabenplatte PC
Produkt	clear pep stage UV PC 40
Drucksteifigkeit D_0 (22)	10048 kN/m
Maximale Kraft	31,9 kN
Verhältnis $\delta = D / G$	3,35

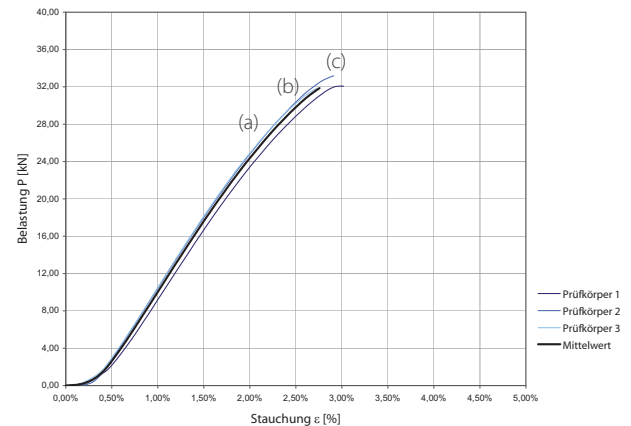


Bild 3.80: D07 - Versuchsdaten und Lastverformungsdiagramm



Bild 3.81: Knittern der Deckschichten (links)
Plötzliches Ausknicken der Platte (rechts)



Bild 3.82: Einschnüren der druckbeanspruchten Seite beim Knicken (links)
Bleibende Verformung nach Abschluss des Versuchs (rechts)

3.3.3.8 Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse

Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse		D01 Doppel-Steg	D02 Doppel-Steg	D03 Mehrfach-Steg	D04 Multi-Steg	D05 Wellen-steg	D06 Tubus-wabe	D07 3D-Wabe	Zeile Protokoll (Anhang)
Werkstoff		PMMA	PMMA	PMMA	PC	GFK	PC	PC	
Querschnittsfläche absolut [cm ²]	A (ca.)	5,89	8,96	6,14	4,3	5,0	3,0	6	
Drucksteifigkeit D (EA-Wert) [kN]	$D = h \cdot dP/du$	1180	1637	935	893	3485	691	1507	
Maximallast [kN]	P	12,4	15,5	18,1	12,8	31,3	12,8	31,9	
Vergleichskennwerte Steifigkeit									
Drucksteifigkeit pro Meter [kN/m]	$D_0 = D / b$	7373	10231	5841	5952	16595	4607	10048	6
Errechnete Drucksteifigkeit [Nm ² /m] nach Sandwichtheorie	$D = 2 E_D t_D b$	7650	13200	7050	4600	24000	4600	9200	7
Äquivalenter Druckmodul [kN/cm ²]	$E_{sq} = D / A$	200	183	152	208	697	230	251	3
Vergleich: Vollplatte [kN/cm ²]	E (Werkstoff)	255	330	235	230	800	230	230	4
Leichtbaukennzahlen									
Durchschnittsgewicht G Versuchskörper [g]	absolut	284	430	300	215	460	225	450	8
Vergleich: Vollplatte [g]		1229	1536	2458	2304	5544	1440	2880	9
Gewichtsverhältnis [%]		23%	28%	12%	9%	8%	16%	16%	
Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	$\delta = D / G$	4,15	3,81	3,12	4,15	8,47	3,07	3,35	10
Vergleich: Vollplatte		5,31	6,88	4,90	4,79	3,41	4,79	4,79	11

Bild 3.83: Statische Kennwerte Druckversuche - Plattentypen im Vergleich (vgl. Anhang A24-A37)

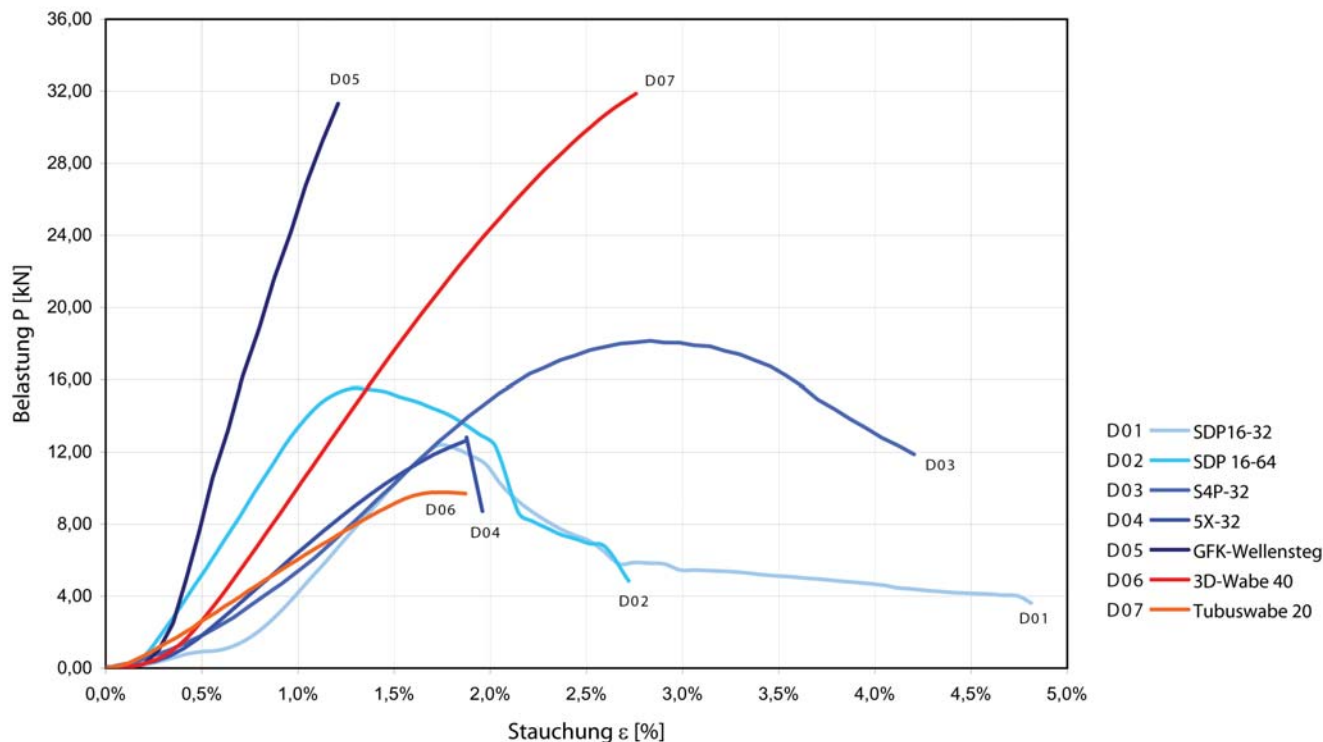


Bild 3.84: Lastverformungsdiagramm Druckversuche - Plattentypen im Vergleich

3.3.4 Versuchsreihen - Abscheren

Die Untersuchung der Plattentypen auf Abscheren läßt Rückschlüsse auf deren Eignung als aussteifende Scheibe unter azentrischer Lasteinwirkung zu. Es bilden sich Zug- und Druckzonen in den Deckschichten aus. In den Druckzonen wird das Sandwichelement zunehmender Instabilität durch Beulen ausgesetzt. Folgende Aspekte standen im Mittelpunkt der Untersuchungen:

- Eignung als Schubfeld, globale Verformung
- Verformungsverhalten der Deckschichten unter Querkraftbeanspruchung in der Fläche
- Stabilisierung durch die Kernschicht
- Örtliches Knittern und Beulen
- Beanspruchung der Schicht- und Randfugen

Die Lasteinleitung erfolgt durch Zug nach oben am freien Plattenrand parallel zur Fläche. Die Versuchseinrichtung sieht Prüfkörpergrößen von 400 x 400 mm vor. Die Last wird über ein U-Profil an der unteren Außenecke als Normalkraft in die Platte eingebracht. Der Kraftzylinder zieht mit 5 mm/min in Z-Richtung. Um ein Verdrehen des Prüfkörpers zu vermeiden, wird im linearen Auflager eine Einspannwirkung erzeugt. Dazu ist der Rand des Prüfkörpers mit Futterblechen auf der Innenseite des stehenden U-Profils geklemmt. Um eine effektive Einspannung der Stegplatten zu erreichen, mussten die randständigen Hohlkammern der Parallelstegplatten S01, S02 und S03 mit Hartholzstreifen, die Kammern von S04 und S05 mit druckfesten Extruderschäum ausgefüllt werden.

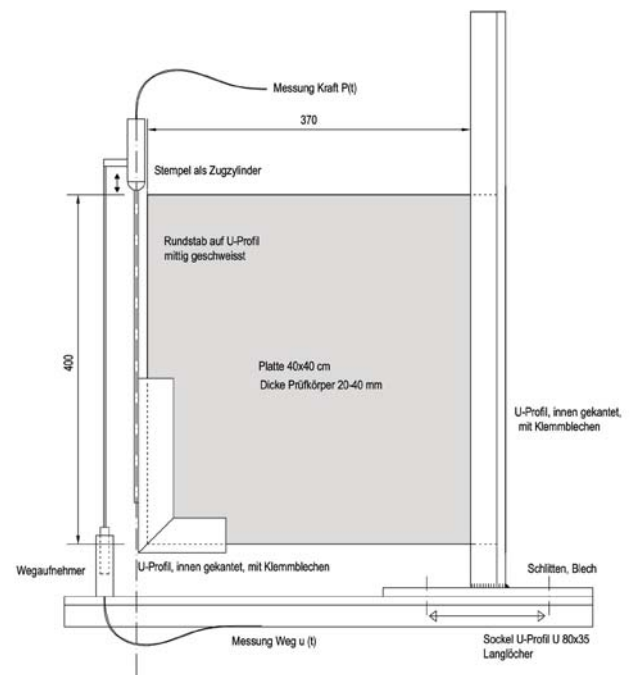
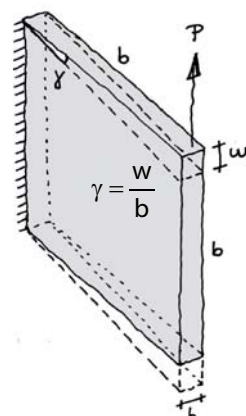


Bild 3.85: Versuchsaufbau

Verfahrweg w [mm] und Kraft P [kN] des Kraftzylinders in Z-Richtung wurden als Wertepaare in 10-Sekunden-Intervallen aufgezeichnet. Die auf den Meßdaten basierenden Kraft-Verformungs-Diagramme (S.105, Bild 3.101) haben rein qualitativen Charakter und ermöglichen einen vergleichende Bewertung des Verformungsverhaltens. Einen quantitativen Vergleich ermöglicht der plattenspezifische Steigungsgradient m aus Gl. 13. Dieser ist wie in Bild 3.86 erläutert, direkt proportional zur Schubsteifigkeit S_{xy} des jeweiligen Prüfkörpers:

$$(23) \quad S_{xy} \sim m$$

Der Steigungsgradient m gibt also direkt Auskunft über die Eignung als Schubfeld im linear-elastischen Bereich.



P erzeugt in der Platte eine Schubspannung τ , die den Prüfkörper um den Winkel γ verschiebt und als Verformung w gemessen wird. Die Platte setzt der Kraft ihre Schubsteifigkeit S_{xy} entgegen, die unter Berücksichtigung von [hel98] S.341f. in folgender Beziehung zu den Meßdaten steht:

$$\gamma = \frac{w}{b} = \frac{P}{G_y \cdot A}$$

$$S_{xy} = G_y \cdot A = \frac{P}{w} \cdot b = m \cdot b$$

Bild 3.86: Beziehung der plattenspezifischen Schubsteifigkeit S_{xy} zum aus den Meßdaten ermittelten Steigungsgradienten m

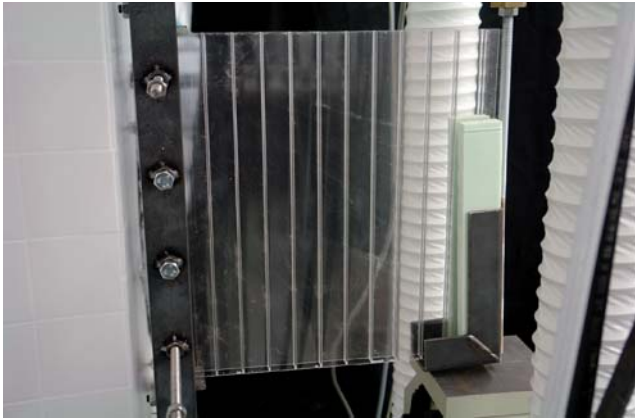


Bild 3.87: S01 - Versuchsaufbau

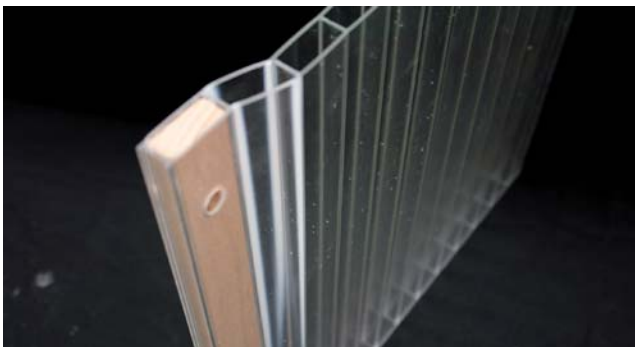


Bild 3.88: S01 - Asymmetrisches Beulen im oberen Auflagerbereich: Plastische Verformungen in den Kontaktzonen Steg/Deckschichten

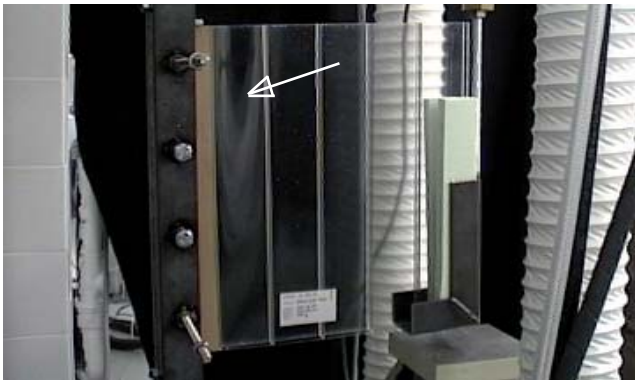


Bild 3.89: S02 - „Spannungsoptische“ Momentaufnahme der symmetrisch beulenden Deckschichten im oberen Auflagerbereich

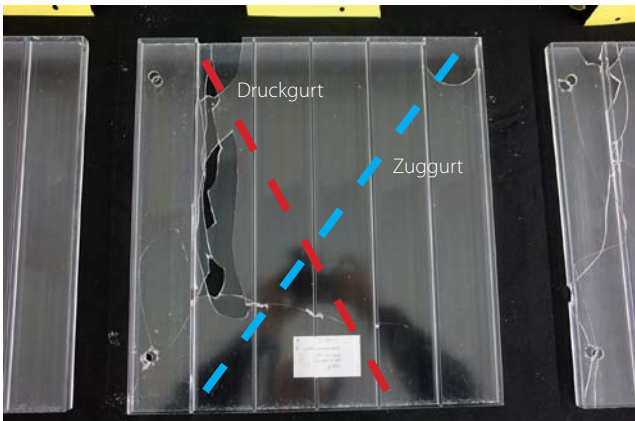


Bild 3.90: S02 - Bruchbild von Prüfkörper 2: Die Risse des Schubbruchs orientieren sich ungefähr entlang des markierten Druckgurtes

3.3.4.1 Auswertung S01 / Hohlkammerplatte PMMA

400x400x16, Stegabstand 32 mm, $m = 1,593$ (1,406 quer)

Die durch die Last P hervorgerufene Querkraftbeanspruchung äußert sich in den Deckschichten als flächige Membranspannungen. Das Moment erzeugt quer zur Stegrichtung Druckspannungen im oberen Randbereich der Platte, Zuspansungen am unteren Rand. Die Stege verhindern das sofortige Ausweichen der Deckschichten. Bis ca. 10 mm Weg ergibt sich gemäß Bild 3.101 eine nahezu linear-elastische Verformung. Die Deckschichten beginnen am oberen Rand zu knittern. Danach werden die Druckspannungen am oberen Auflagerpunkt so groß, daß die Platte anfängt, in diesem Bereich asymmetrisch zu beulen. Ähnlich wie im Druckversuch versagt die Platte nicht bruchartig, sondern verformt sich in den Schichtfugen plastisch weiter (Bild 3.88). Die Eintrübung des schlagzäh modifizierten PMMA nimmt gleichmäßig nach unten bis etwa zur Plattenmitte ab und macht so die überbeanspruchten Bereiche sichtbar. Bei 2 Prüfkörpern wurde bei Erreichen der Maximalverformung ein Anriss der Schichtfuge am oberen Rand festgestellt. Im Anschluss wurde die Platte mit horizontalen Stegen (Prüfkörper um 90° gedreht) getestet. Sie weist ein nahezu identisches Verformungsverhalten auf.

3.3.4.2 Auswertung S02 / Hohlkammerplatte PMMA

400x400x16, Stegabstand 64 mm, $m = 1,856$

Der Versuch zeigt ein ähnliches Verformungsverhalten wie bei S01, die Schubsteifigkeit ist werkstoffbedingt etwas höher. Aufgrund der weiten Stegabstände sind die Amplituden der Knitterwellen größer. Die Lichtbrechung zeigt sehr deutlich, wie die symmetrische nach außen orientierte Wölbung der Deckschichten zur spannungsarmen Plattenmitte hin abnimmt (Pfeil Bild 3.89). Die Wölbung ruft in den Kontaktstößen zwischen Steg und Deckschicht hohe Spannungen hervor, die letztendlich zum Reißen der Platte führen. Die Risse verlaufen bei allen drei Prüfkörpern zunächst in vertikaler Richtung und pflanzen sich durch die Stege fort (Bild 3.90). Im unteren Bereich verlaufen die Bruchfugen diagonal und zunehmend flacher. Sie folgen in etwa den sich einstellenden Druckspannungstrajektorien in der Scheibe. Wie bei den Druckversuchen stellt die Schichtfuge wiederum die Bruchstelle dar, hervorgerufen durch die großen Beulverformungen der druckbeanspruchten Deckschichtbereiche.

3.3.4.3 Auswertung S03 / Mehrfachstegplatte PMMA

400x400x32, Stegabstand 32 mm, $m = 1,706$

Das Verformungsverhalten sowie die Schubsteifigkeit im linear-elastischen Bereich entspricht in etwa S01 und S02. Ab 1,8 kN Last weicht die Platte nahe der oberen Einspannstelle über eine Kammerbreite zur Seite aus. Diese örtliche Instabilität ruft ein Verkanten und Tordieren der Platte über die Höhe hervor. Die Parallellagen werden ohne Widerstand mitverformt. Ähnlich wie bei S01 stellt sich bei zunehmender Verschiebung eine plastische Verformung an den Kontaktstellen zwischen Deckschicht und Stegen ein. Die Kammern werden hintereinander rautenförmig zusammengeschoben, die Auslenkung nimmt am oberen Einspannpunkt entsprechend zu, was auch zur Stagnation der notwendigen Kraft führt (Bild 3.101). Aufgrund des weichen, schlagzäh modifizierten PMMA kommt es jedoch nicht zum Bruch der Platte. Nach Rücknahme der Kraft verbleibt eine ähnliche Endverformung wie bei S01. Die festgestellte Instabilitätsform offenbart die Schwäche der Platte durch Druckkräfte quer zur Stegrichtung. Eine Drehung der Platte führte wie bei S01 zu vergleichbaren Ergebnissen. Die aufgezeigte Instabilitätsform stellt sich nun an der Lasteinleitungsstelle ein, da hier die horizontal orientierten Stege wiederum rechtwinklig auf Druck beansprucht werden.

3.3.4.4 Auswertung S04 / Multistegplatte PC

400x400x32, Stegabstand 12 mm, $m = 1,490$

Verformungsverhalten und Schubsteifigkeit ähneln anfänglich den anderen Stegplattentypen, die feinere Struktur und die dünneren Schichtdicken bewirken jedoch ein sehr viel früheres Eintreten der örtlichen Instabilität an der oberen Einspannstelle. Die asymmetrische Auslenkung ist geringer als bei S03, die folienartigen Deckschichten und Stege werden aber sofort gemeinsam zusammengedrückt, ein vorhergehendes Knittern der Deckschichten ist nicht festzustellen. Da die Schichtkomponenten sehr biegeweich sind, kommt es nicht zu so starken plastischen Verformungen wie bei S01 und S03. Nach Rücknahme der Kraft verbleibt dennoch eine geringe plastische Restverformung. Aufgrund der geringeren Schichtdicken führt die Druckbeanspruchung quer zur Stegrichtung sehr viel früher zum Stagnieren der Kraft, wie Bild 3.101 zeigt. Der Plattentyp zeigt daher das ungünstigste Verhalten.

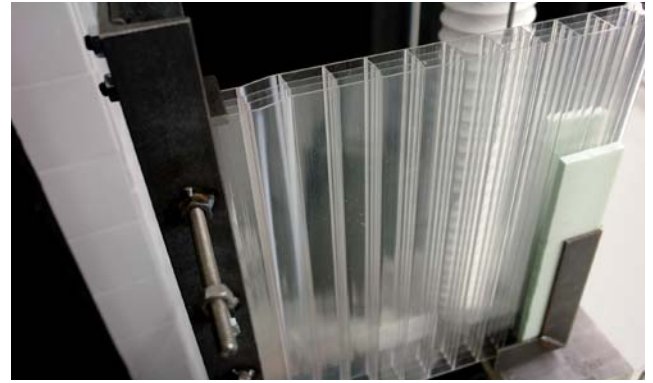


Bild 3.91: S03 - Asymmetrisches Beulen der Platte im oberen Auflagerbereich: Beginn der plastischen Verformung

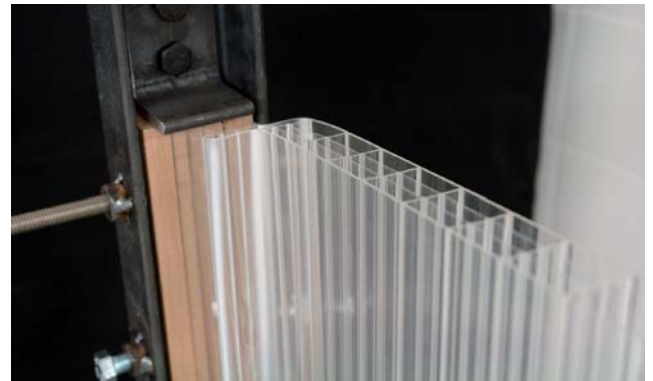


Bild 3.92: S03 - Rautenförmiges Zusammenschieben der Hohlkammern, plastische Verformungen im Bereich der T-Stöße



Bild 3.93: S04 - Versuchsaufbau

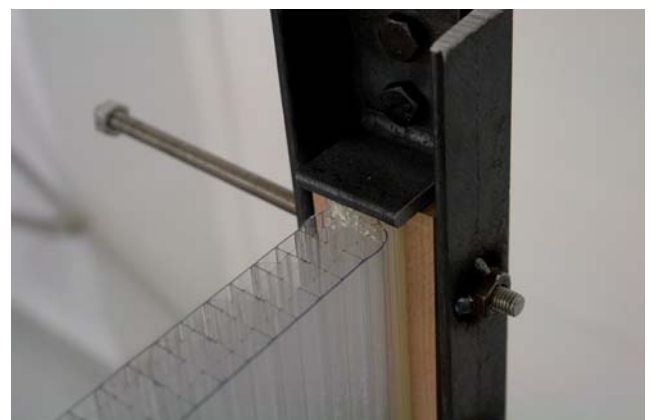


Bild 3.94: S04 - Gleichförmiges Zusammendrücken des Gesamtgefüges aufgrund zu hoher Druckbeanspruchung quer zur Stegrichtung

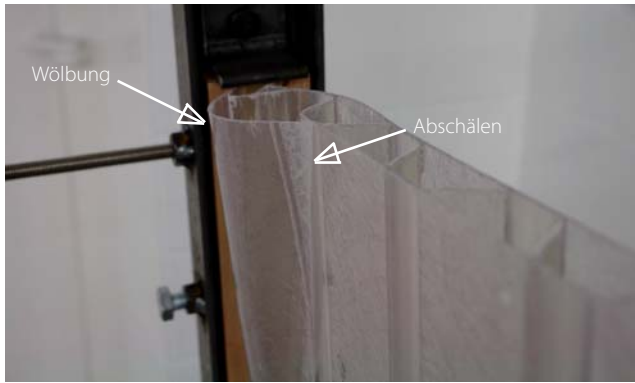


Bild 3.95: S05 - Örtliches Beulen und Abschälen der Deckschicht auf der wellenabgewandten Seite (links)

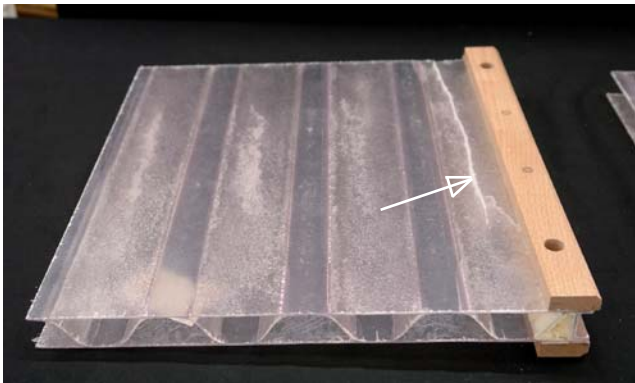


Bild 3.96: S05 - Rißgeometrie von Prüfkörper 2, der nach Wegnahme der Kraft in seinen Ursprungszustand zurückgekehrt ist.

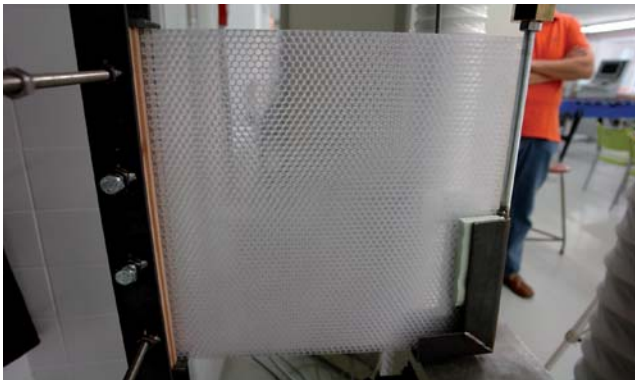


Bild 3.97: S06 - Versuchsaufbau Tubuswabenplatte



Bild 3.98: S06 - Lokale Instabilität des Gesamtgefüges am Lasteinleitungspunkt

3.3.4.5 Auswertung S05 / Wellenstegplatte GFK

400x400x30, Stegabstand 68 mm, $m = 1,694$

Das Verformungsdiagramm in Bild 3.101 zeigt trotz höhere Materialsteifigkeit (GFK) eine den Stegplatten S01 - S03 vergleichbare Steigung der Kraft-Dehnungslinie im linear-elastischen Bereich. Die Querschnittsgeometrie scheint sich ungünstig auf das Schubverhalten der Platte auszuwirken. Die Querbeanspruchung der Stege in der Druckzone nahe des oberen Auflagerbereichs führt im Vergleich zu S01 - S03 wesentlich früher zum örtlichen Beulen der Deckschichten, was auf den größeren Stegabstand zurückzuführen ist. Dabei wölbt sich vor allem die Deckschicht auf der wellenabgewandten Seite stark nach außen (Bild 3.95), was zu einer außermittigen Beulverformung der gesamten Platte führt. Diese Instabilität verstärkt wiederum das Aufwölben der Deckschicht und bewirkt schließlich das Aufreißen der Schichtfuge und das Abschälen der Deckschicht. Die weiter zunehmende Wölbung der Deckschicht führt schließlich zu deren Bruch. Der Riß verläuft stegparallel bis etwa zur Mitte der Platte (Bild 3.96), ist aber nicht durchgängig, die Glasfasern sind teilweise noch intakt. Nach Wegnahme der Kraft kehrt die Platte in ihren Ursprungszustand ohne Restverformung zurück.

3.3.4.6 Auswertung S06 / Tubuswabenplatte PC

400x400x20, Zellabstand 7,5 mm, $m = 0,915$

Die Tubuswabenplatte verfügt über eine geringere Schubsteifigkeit als die anderen Plattentypen, was vor allem auf die geringere Dehnsteifigkeit der dünneren Polycarbonat-Deckschichten zurückzuführen ist. Die Stabilisierung der Deckschichten durch den Tubuswabenkern ist aber in allen Bereichen der Platte gegeben. Auch in der druckbeanspruchten Auflagerzone ist keine Instabilität zu erkennen.

Bei ca. 1,2 kN stagniert der Krafteintrag, die Platte wird am Lasteinleitungspunkt vom Stahlwinkel vollflächig gequetscht. Nach Rücknahme der Kraft fällt auf, dass die Deckschichten in diesem Bereich teilweise vom Kern abgeschält und verbogen sind. Auch einige Waben sind zusammengeschoben. Die örtliche Instabilität stellt sich folglich am Lasteinleitungspunkt und nicht wie bei den Stegplatten am oberen Einspannrand ein. Die Quetschung führt jedoch nicht zu einem seitlichen Ausweichen, wie bei den Stegplatten beobachtet (Bild 3.98).

3.3.4.7 Auswertung S07 / 3D-Wabenplatte PC

400x400x40, Zellabstand 25 mm, $m = 2,888$

Die Platte weist über den gesamten Versuchsablauf ein nahezu linear-elastisches Verformungsverhalten und keine nennenswerten Instabilitäten auf. Die Schubsteifigkeit ist im Vergleich zu den anderen Plattentypen um ca. 80% höher, wie Bild 3.101 zeigt. Die Platte verfügt über eine effektive Schubfeldwirkung. Die Deckschichten sind in der Lage, die Querkraftbeanspruchung gleichmäßig in der Fläche aufzunehmen. Der Stabilisierungseffekt der Kernschicht ist während des gesamten Versuchsverlaufs gegeben, auch im Bereich der druckbeanspruchten Auflagerzone sind keine örtlichen Verformungen festzustellen. Nach Rücknahme der Kraft sind geringe Druckstellen durch den oberen Stahlwinkel der Versuchsapparatur auszumachen. Die Klebefuge scheint nach Überprüfung der Platte vollständig intakt. Ab etwa 3,5 kN Krafteintrag bewirkt die aus der Momentenbeanspruchung resultierende Zugkomponente ein langsames, aber stetiges Herausziehen der Platte im unteren Bereich der Auflagerinspannung. Da die Klemmwirkung durch die Kernsteifigkeit quer zur Platte begrenzt ist, lässt sich dieser Effekt versuchstechnisch nicht vermeiden, die Aussagekraft der Meßdaten bleibt hiervon jedoch unberührt.

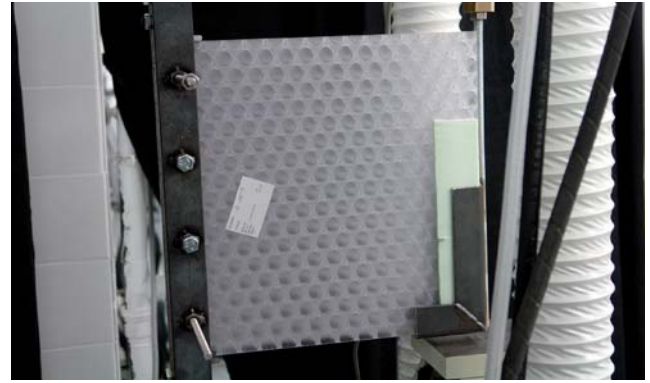


Bild 3.99: S07 - Versuchsaufbau



Bild 3.100: Zweiter Prüfkörper ohne Instabilitäten kurz vor Abschluss des Versuchs

3.3.4.8 Gegenüberstellung der Ergebnisse

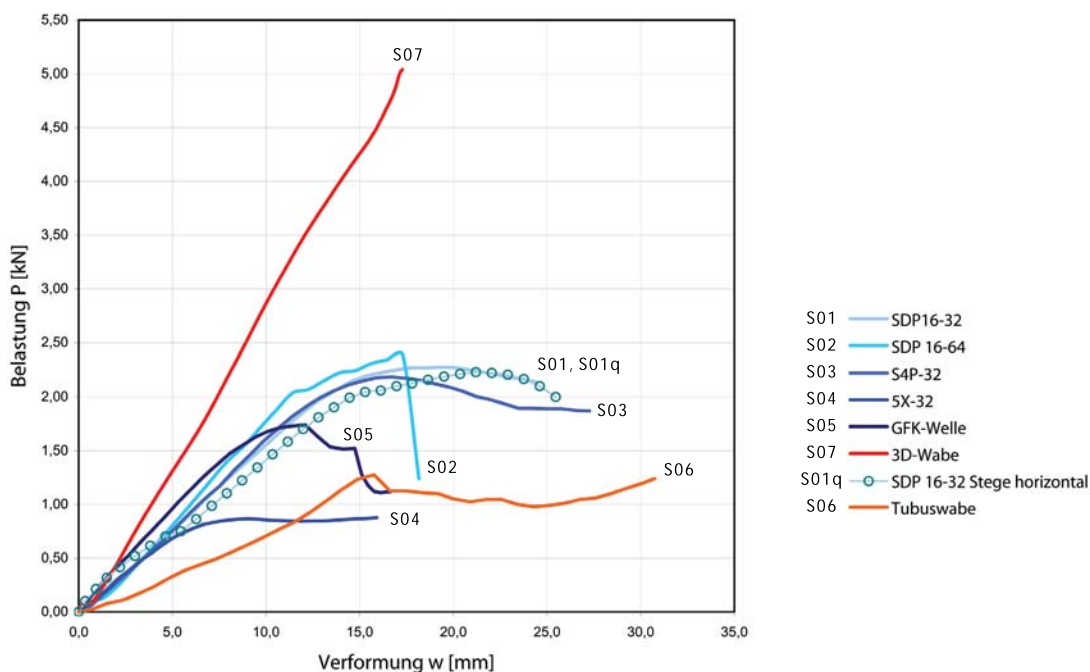


Bild 3.101: Last-Verformungs-Diagramm - Abscheren Vergleich Versuchsprotokolle siehe Anhang, A38-A45

3.4 Bewertung der Versuchsergebnisse

3.4.1 Vergleichende Beurteilung des Tragverhaltens

- Parallelstegplatten PMMA (01,02,03)

Die Stegplattentypen 01 und 03 zeigen deutlich, wie sich die schlagzähe Modifizierung des Werkstoffs PMMA auswirkt. Die zu geringe Materialsteifigkeit des Werkstoffs führt zu frühzeitigem Versagen durch örtliches Beulen und Knittern. Die Plattentypen verformen sich plastisch, bewahren die Struktur so aber vor Spontanbruch. Das Stabilitätsvermögen der stegartigen Kernschicht ist zudem aufgrund zu großer Stegabstände begrenzt. Der Plattentyp 02 aus reinem PMMA ist stabiler aufgrund seiner um ca. 50% höheren Materialsteifigkeit und der größeren Querschnittsfläche. Die Werkstoffsprödigkeit und die lokalen Spannungsspitzen an T-Stößen führen im Gegensatz zu 01 und 03 zum plötzlichen Bruchversagen bei Druck und Abscheren.

- Multistegplatte PC (04)

Diese verfügt aufgrund der fachwerkartigen X-Struktur über eine wenn auch geringe Stabilität quer zur Stegrichtung. Die Stege der Platte mit dem geringsten Flächengewicht besitzen aufgrund der dichten Staffelung ein vergleichsweise gutes Verhältnis von Steifigkeit zu Gewicht bei Biegebeanspruchung. Bei Druck- und Schubbeanspruchung sind vor allem die folienartigen Deckschichten nicht wirklich tragfähig und werden mit den Stegen bereits bei niedrigem Lastniveau zusammengedrückt.

- Wellenstegplatte GFK (05)

Dieser Plattentyp weist aufgrund dehnsteifer Deckschichten gute Steifigkeitswerte im linear-elastischen Bereich auf, besonders bei Biege- und Druckbeanspruchung. Vorteilhaft zu bewerten ist der flächige Verbund zwischen Wellensteg und Deckschicht, der zu einer hohen Anfangsstabilität beiträgt. Große Stegabstände, entsprechend schlanke Stege und Deckschichten und deren spitzwinklige Anschlußgeometrie führen jedoch in Verbindung mit der hohen Werkstoffsprödigkeit bei höheren Lastniveaus zu globaler Instabilität und Spontanbruch.

- Tubuswabenplatte PC (06)

Dieser Plattentyp verfügt aufgrund seiner geringen Schichtdicke und den dünnen und dehnweichen PC-Deckschichten über vergleichsweise hohe Verformungen, die Stabilität ist aber bei allen drei Belastungsszenarien gewährleistet. Der Versagensfall tritt vor allem bei Druck und Abscheren durch Aufbrechen der geringflächigen Schichtfuge ein, welche die konstruktive Schwachstelle dieses Plattentyps ist.

- 3D-Wabenplatte PC (07)

Dieser Plattentyp weist besonders bei Biege- und Schubbeanspruchung ein nahezu linear-elastisches Verformungsverhalten auf. Obwohl der Plattentyp die geringste Werkstoffsteifigkeit (Polycarbonat) besitzt, erreicht die 3D-Wabenplatte die höchsten Lastniveaus (zwei- bis dreimal so hoch wie bei anderen Plattentypen aus thermoplastischen Kunststoff) bei allen drei Versuchsszenarien. Der Materialanteil am Querschnitt ist aufgrund der dichten Kernstruktur mit ca. 18% relativ hoch, ist aber auch Grund für die guten Stabilitätseigenschaften. Das Gesamtgefüge weist jedoch besonders bei Druckbeanspruchung zu hohe Verformungen auf, was auf die geringe Materialsteifigkeit der Deckschichten zurückzuführen ist.

3.4.2 Zusammenfassende Bewertung

Die Versuchsreihen haben gezeigt, dass die einzelnen Plattentypen aufgrund ihres unterschiedlichen Aufbaus hinsichtlich Werkstoff, Struktur und Abmessung ein sehr differenziertes Tragverhalten aufzeigen. Aufgrund der großen materiellen und geometrischen Unterschiede der einzelnen Plattentypen konnte über geeignete Verhältniswerte wie β oder δ ansatzweise eine Vergleichbarkeit zur Prognose des statisch-konstruktiven Potentials hergestellt werden.

Zusammenfassend lässt sich auf Grundlage der Versuchsergebnisse feststellen:

1. die Wabenplatten sind den Stegplatten im Tragverhalten grundsätzlich überlegen.
2. Im Vergleich der untersuchten Plattentypen weist die „3D-Wabenplatte“ insgesamt das günstigste Tragverhalten auf.
3. Als Hauptproblem aller rein aus thermoplastischen Kunststoffen bestehenden Plattentypen (außer Typ 05) ist die zu geringe Dehnsteifigkeit und Festigkeit des Deckschichtmaterials zu nennen. Aus ihnen resultieren letztendlich die geringen Biegesteifigkeiten und Drucksteifigkeiten der Plattentypen. Aus statisch-konstruktiver Sicht sind thermoplastische Kunststoffe wie PMMA und PC für die Verwendung als Deckschichtlagen daher als eher ungünstig einzuschätzen.
4. Die Versuchsreihen haben deutlich gemacht, dass das Verformungshalten unmittelbar von der geometrischen Struktur der Kernschicht abhängt. Bei Betrachtung der drei Last-Verformungsdiagramme in Bild 3.56, 3.84 und 3.101 fällt auf, dass der Anteil des linear-elastischen Verformungsbereiches von Stegplatten gegenüber Wabenplatten wesentlich geringer ist. Ein wesentliches Defizit der Stegplatten stellt die nicht oder nur sehr eingeschränkte Steifigkeit quer zur Stegrichtung dar. Sie ist Hauptursache für das frühe Auftreten von lokalen und in der Folge globalen Instabilitäten. Zudem begrenzen zu große Stegabstände das Stabilitätsvermögen der Stege. Aus Verformungen resultierende Spannungen werden teilweise durch plastisches Umformen der thermoplastischen Werkstoffe kompensiert, sodass es gar nicht oder erst spät zum Bruch der Struktur kommt. Wie vor allem in den Abscherversuchen deutlich geworden ist, sind stegartige Sandwichstrukturen für einen biaxialen Lastabtrag in der Fläche nicht geeignet. Aufgrund der eingeschränkten Stabilisierungswirkung ist dessen Tragfähigkeit stark begrenzt. Für selbsttragende bzw. tragende Anwendungen sind transluzente Stegplatten daher weitgehend ungeeignet.
5. Die untersuchten Wabenplatten sind gerade hinsichtlich der Stabilität wesentlich günstiger einzuschätzen. Ungeachtet der in 3. genannten Deckschichtproblematik zeigen die Plattentypen als quasiisotrope Sandwichstrukturen bei allen drei Versuchsszenarien gute Stabilitätseigenschaften auf. Dies liegt vor allem an der dichten und kompakten Anordnung der Waben, die für eine große Querstabilität sorgen, aufgrund der dünnen Wabenwandungen das Flächengewicht aber klein halten. Wie vor allem die Abscherversuche gezeigt haben, sind diese Plattentypen sowohl für einachsigen als auch zweiachsigen Lastabtrag in der Fläche geeignet. Dies ermöglicht größere Spannweiten bzw. Elementgrößen, z.B. für geschoßhohe Fassaden. Die nachgewiesene Eignung als flächig beanspruchbares Tragelement macht Wabenplatten auch für elementierte Flächentragwerke geringer Spannweiten wie Falterwerke, Tonnen oder Scheibentragwerke interessant.

Die Versuchsreihen haben gezeigt, dass die 3D-Wabenplatte (07) im Vergleich das größte statisch-konstruktive Potential besitzt. Das Ausbleiben typischer Instabilitätsformen und das nahezu linear-elastische Verformungsverhalten bei allen drei Belastungsszenarien bescheinigt der transluzenten Sandwichstruktur ein gutes statisches Zusammenwirken von Deckschicht, Schichtfuge und Kernschicht im Sinne der Sandwichbauweise. Die beschriebenen Defizite besonders hinsichtlich der unzureichenden Deckschichtsteifigkeit erfordern jedoch Handlungsbedarf.

Durch eine nach den einzelnen Schichtkomponenten differenzierte Gefügeoptimierung der 3D-Wabenplatte könnte die Nutzung des Sandwicheffektes und damit das Tragverhalten weiter verbessert werden. In dessen Konsequenz könnten sich gegebenenfalls auch weitere technische und funktionale Eigenschaften einstellen.

4. Ansätze zur statisch-konstruktiven Optimierung der 3D-Wabenplatte

4.1 Grundlagen und Vorgehensweise der Optimierung

Das durch die Versuche in Kapitel 3 belegte statisch-konstruktive Potential wird in Kapitel 4 weiter untersucht und einer Optimierung zur weiteren Ertüchtigung des Sandwichverbundes unterzogen. In diesem Abschnitt erfolgt daher zunächst eine vertiefende Analyse des Strukturgefüges, um auf dessen Grundlage gezielt Optimierungsmaßnahmen zu formulieren, die das Tragverhalten weiter verbessern können. Hierzu werden jeweils separat die Funktionsweise der Kern- und Deckschichtlage analysiert, um deren Wirksamkeit auf das Sandwichgefüge eindeutig zuordnen zu können. Interessant erscheinen in diesem Zusammenhang auch die Auswirkungen auf das Eigenschaftsprofil der Sandwichstruktur in funktionaler und gestalterischer Hinsicht. Auffällig erscheint die bereits in Kapitel 2 aufgezeigte direkte Wechselbeziehung zwischen der Strukturform des räumlichen Wabenkerns und des ihr zugrunde liegenden Herstellungsprozesses (Prozess-Eigenschaftsbeziehungen). Durch Optimierungsansätze in der Kernschicht soll herausgefunden werden, ob es alternative Strukturgeometrien des Kerns gibt, die sich nach dem gleichen Herstellungsprinzip generieren lassen, jedoch durch geometrische Modifikation zu Verbesserungen in statisch-konstruktiver Hinsicht führen. Die Optimierung in der Deckschichtlage wird das in Kapitel 3 festgestellte Defizit der ungenügend festen und dehnsteifen Polycarbonat-Deckschichten aufgreifen und geeignete Materialalternativen aufzeigen.

4.2 Morphologische Strukturanalyse der 3D-Wabenplatte

Die 3D-Wabenplatte entsteht durch flächige Verklebung transluzenter Deckschichten mit dem räumlich strukturierten Wabenkern aus Polycarbonat. Grundlegende Angaben zu Herstellungsprinzip, Funktion und Gestalt des Kerns bzw. des Gesamtgefüges wurden bereits in Kapitel 2.2.3.2 behandelt. Die Versuchsreihen aus Kapitel 3 bescheinigen der 3D-Wabenplatte gute Trageigenschaften, besonders hinsichtlich der Stabilisierungswirkung. In der Folge sollen die geometrischen Zusammenhänge der Kernschicht vertieft sowie deren differenzierte Tragwirkung durch gesonderte Versuchsreihen genauer untersucht werden, um deren Anteil an der statisch-konstruktiven Funktionsweise im Sandwichverbund noch genauer einschätzen zu können. Hierbei wird vor allem folgenden Fragestellungen nachgegangen:

- Welchem geometrischen Prinzip unterliegt der Herstellungsvorgang des Wabenkerns?
- Welche Faktoren bewirken die gute Stabilisierungswirkung der Kernschicht?
- Was macht die Eignung des thermoplastischen Materials Polycarbonat für die Kernstruktur aus?
- Stellt der Kern für sich bereits eine räumliche Tragstruktur bzw. Sandwichstruktur dar? Welche Struktur analogien gibt es?
- Welchen Einfluß haben verschiedene Kernschichtdicken auf das Tragverhalten?

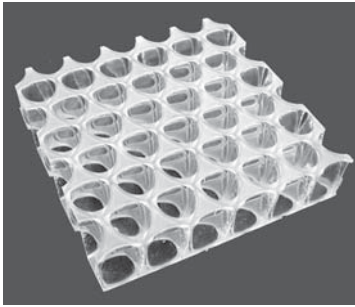


Bild 4.01: Struktur des 3D-Wabenkerns

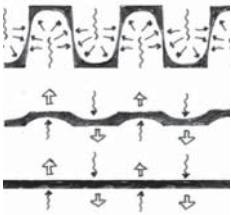


Bild 4.02: Fertigungsprinzip des 3D-Wabenkerns

- a Achsmaß des dreiecksförmigen Lochrasters
- d Waben-Durchmesser
- s Versatzmaß Lochraster = Wabenabstand
- ü Überlappungsmaß der kreisförmigen Waben

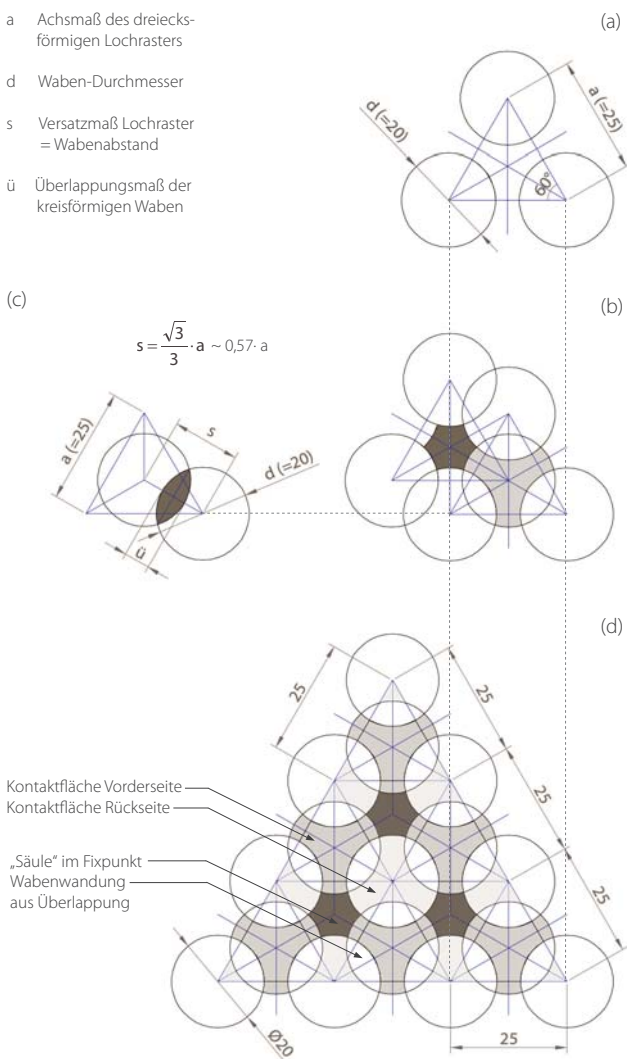


Bild 4.03: Aus der Überlagerung zweier triangulierter Lochraster ergibt sich das stereometrische Grundmuster der Kernstruktur

4.2.1 Geometrische Untersuchung der Kernschicht

Die dreidimensional geformte Kernschicht entsteht durch die kontrollierte Verformung einer Polycarbonat-Vollplatte quer zur Fläche unter Einwirkung von Wärme und Druck (vgl. S.50). Der Ziehprozeß erlaubt stufenlose Kerndicken und bestimmt den Abstand der Deckschichten.

Die vertiefende Analyse des Strukturprinzips erfolgt anhand eines abstrahierten geometrischen Modells, das eine mathematische Genauigkeit vorschreibt, welche so in der Praxis jedoch nicht vorliegt. Die differenzierte Schichtdickenverteilung bleibt zunächst unberücksichtigt. Die geometrischen Modelle haben beschreibenden Charakter und stellen lediglich theoretische Ersatzsysteme dar.

4.2.1.1 Geometrisches Prinzip

Die geometrischen Grundzusammenhänge erschließen sich durch ein einfaches, stereometrisches Modell in der xy-Ebene (Bild 4.03). Da es sich um eine Parallelprojektion der Kernstruktur handelt, besitzt das Modell für alle Kerndicken Gültigkeit.

Bild 4.03a zeigt die Anordnung dreier Kreise, deren Mittelpunkte in den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks der Kantenlänge a angeordnet sind. Der einheitliche Kreisdurchmesser d ist kleiner als die Dreiecksseite a , die Kreise berühren sich nicht. Die versetzte Anordnung zweier Grundeinheiten zeigt Bild 4.03b und macht das geometrische Prinzip deutlich. Der Mittelpunkt des Kreises fällt dabei genau mit dem Mittelpunkt des gleichseitigen Dreiecks zusammen (Bild 4.03c). Die Kreise schneiden sich jeweils untereinander mit dem einheitlichen Maß \bar{u} , wobei für das Auftreten der Überlappung gelten muss: $1 < a/d < \sqrt{3}$. Durch Vervielfältigung der Grundeinheiten stellt sich die in Bild 4.03d dargestellte Dreiecksstruktur zweier übereinanderliegender Lochraster ein.

Die gezeigte geometrische Konstellation entspricht der Anordnung und Perforationsgeometrie der zur Fertigung notwendigen Aluminium-Lochplatten (vgl. Fertigungsprozeß in Kapitel 2.2.3.2). Bild 4.04 zeigt die Überlagerung der Lochraster um das Versatzmaß s . Sie geben bei der Herstellung durch Überdruck und Wärmeeinwirkung die Verformungsgeometrie der Polycarbonatplatte vor (Bild 4.01). Dabei wird beim Ziehprozess der Werkstoff aufgrund der Überdrucksituation jeweils wechselweise gegen die Aluminiumplatte der anderen Seite gedrückt. Diese Bereiche bilden die Außenseiten der Kernschicht,

da hier der Werkstoff bündig an der Aluminiumplatte anliegt. Der gewählte Versatz aus Bild 4.03c sorgt dafür, dass einer Wabenöffnung immer eine geschlossene Außenseite (hellgraue Flächen in Bild 4.03d) gegenüberliegt. Die dunkelgrau markierten Flächen in Bild 4.03d stellen die „kreisfreien“ Bereiche der Außenseiten dar. Diese Bereiche werden in der Folge als „Säulen“ bezeichnet, da hier der Werkstoff über die gesamte Kerndicke durchgängig und prismatisch ausgebildet ist. Um diese orientieren sich immer sechs Waben, deren Öffnungen im Wechsel nach vorne und hinten orientiert sind. In den Überlappungsbereichen der Wabenöffnungen bilden sich die Wandungsflächen aus, die eine weitere vertikale, kontinuierliche Verbindung zwischen den Außenseiten bilden und die Waben über die Kernhöhe zueinander hermetisch abschließen.

4.2.1.2 Analyse der räumlichen Struktur

Vergleicht man das abstrahierte Geometriemodell mit der gefertigten Kernstruktur, so fällt auf, dass die Wabenöffnungen nicht genau kreisrund, sondern wie in Bild 4.05 dargestellt die Form eines gerundeten Dreiecks aus Segmentbögen einnehmen. Dies ist auf den Fertigungsprozeß zurückzuführen. Der durch Wärme- und Druckeinwirkung begleitete Ziehvorgang bewirkt das Einschnüren der prismatischen „Säulen“, vor allem in Kernmitte. Bild 4.06 zeigt die entsprechende Modifikation des Grundmusters aus Bild 4.03d unter Berücksichtigung des genannten Sachverhalts und stellt das abstrahierte Geometriemodell einer gescannten Ansicht eines gefertigten 3D-Wabenkerns (linke Seite) entgegen.

In Bild 4.06 ist ersichtlich, dass die Außenseiten jeweils kontinuierlich durchlaufen (alle grau markierten Flächen) und ein regelmäßiges, trianguliertes Muster ausbilden. Sie stellen gleichzeitig die Kontaktflächen für den Deckschichtverbund dar, die ca. 35% der ebenbündigen Gesamtoberfläche ausmachen. Das Bild zeigt zudem sehr anschaulich, dass die Waben in maximaler Packungsdichte zusammenstehen. Die Überschneidung bedingt eine konische Form der Waben, die von der Kerndicke abhängt. Je höher die Kernschicht, desto größer ist der Verjüngungswinkel α in Wandungsmitte (Bild 4.07). Für einen 20 mm dicken Kern ergibt sich nach Messung ein Winkel von ca. 75°, bei 40 mm Kernstärke 83° und bei 80 mm mit einem Winkel von 86° sehr flache und damit fast ebene Wabenwandungen.

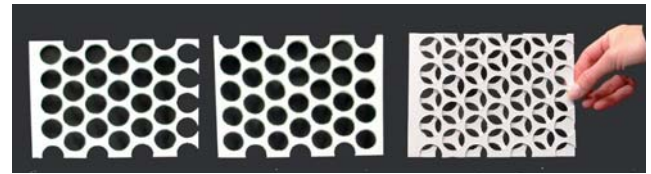


Bild 4.04: Die Überlagerung der beiden Lochraster im Modellversuch als Analogie zum Fertigungsprozeß (siehe Kapitel 2.2.3.2). Die verbleibenden Flächen der perforierten Platten entspricht der Kontur der Kernaussenseiten.

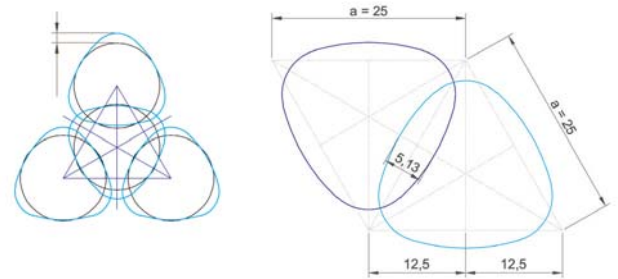


Bild 4.05: Transformation des Kreises in ein abgerundetes Dreieck aufgrund des Einsatzes von Wärme und Druck im Fertigungsprozeß

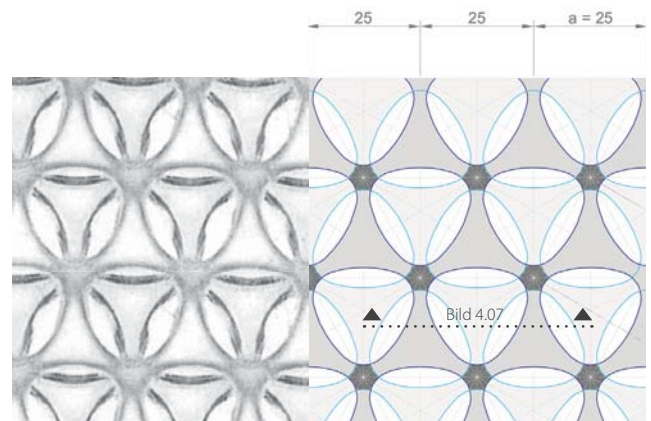


Bild 4.06: Geometrisches Grundmuster des 3D-Wabenkerns: Material-Scan (links), digitales Modell (rechts)

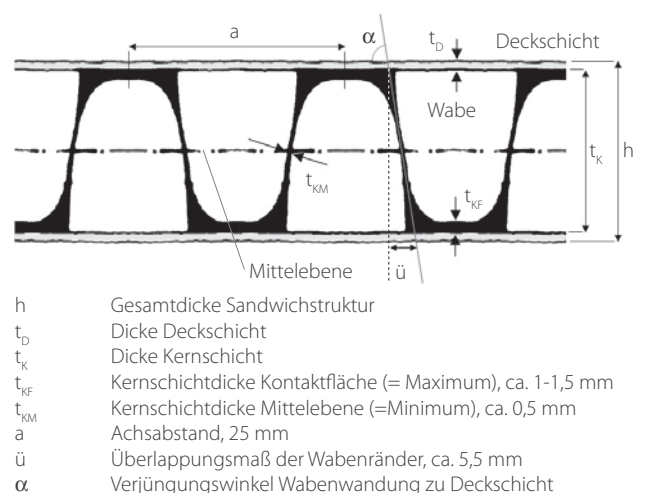


Bild 4.07: Vertikalschnitt durch die Kernschicht gemäß Bild 5

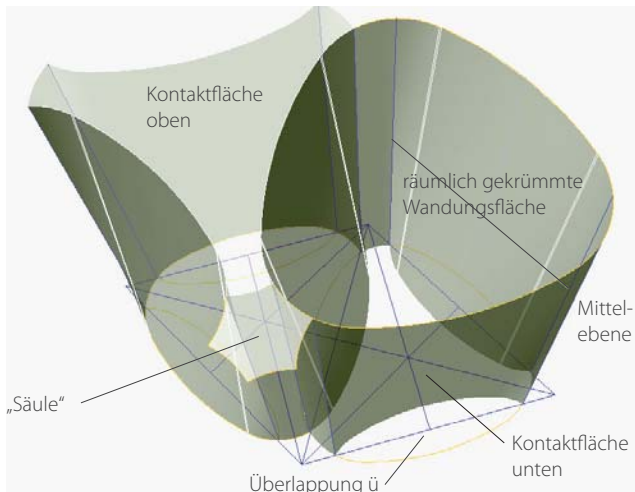


Bild 4.08: 3D-Wabenkern aus Polycarbonat

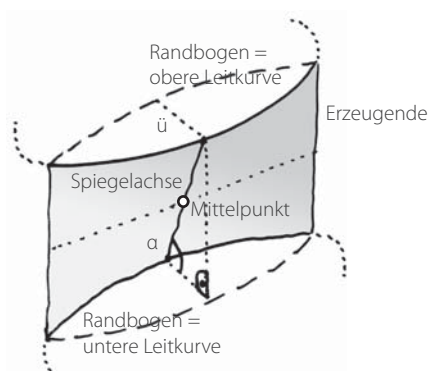


Bild 4.09: Abstrahierte geometrische Form der Wandungsfläche als achsensymmetrische Regelfläche

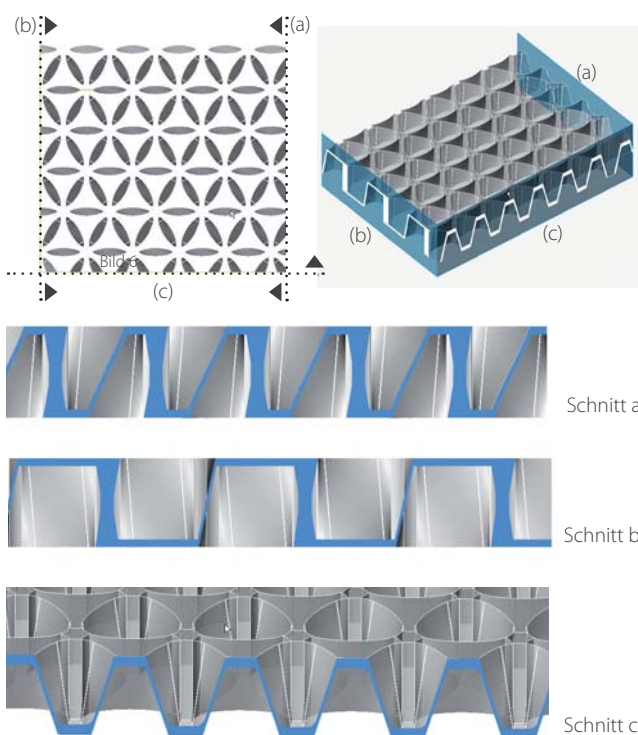


Bild 4.10: Charakteristische Schnittgeometrien (a), (b), (c) der Kernstruktur

Bild 4.07 macht zudem die im geometrischen Modell bisher unberücksichtigte Schichtdickenverteilung deutlich. Aufgrund des Fertigungsverfahrens konzentriert sich wie bereits erläutert der Werkstoff jeweils auf der gegenüberliegenden Seite der Wabenöffnung. Der Ziehvorgang und die wechselseitige Überdrucksituation bewirkt eine Abnahme der Schichtdicken der Wabenwände mit zunehmender Kerndicke. Die Schichtdicke ist dabei in der Mittelebene jeweils am geringsten (t_{KM} in Bild 4.07), im Randbereich am größten (t_{KR}).

Das abstrahierte 3D-Modell zweier benachbarter Waben zeigt Bild 4.08. Die Waben sind jeweils zur einen Seite geöffnet bzw. zur anderen Seite geschlossen. Erkennbar ist auch die prismatische Form der in den Dreieckspunkten angeordneten „Säulen“. Die in Bild 4.03c erläuterte Überschneidung \ddot{u} bewirkt die räumliche Krümmung der Wandungsflächen. Die kreissegmentartigen Ränder der Wabenöffnungen zwischen den „Säulen“ spannen jeweils eine räumlich gekrümmte Regelfläche auf (Bild 4.09). Sie fungieren dabei als Leitkurven einer erzeugenden Geraden, die in der Mitte der Fläche die stärkste Neigung besitzt. Die Schnittkurve der Wandungsfläche mit der Mittelebene stellt ebenfalls eine Gerade dar. Die Wandungsfläche weist eine Punktsymmetrie zu ihrem geometrischen Mittelpunkt auf, sie ist gleichzeitig achsensymmetrisch.

Bild 4.10 zeigt in einem abstrahierten 3D-Modell eines 20 mm hohen Kerns drei wesentliche Schnittgeometrien der Kernstruktur: Schnitt (a) verläuft durch den geometrischen Mittelpunkt der Wandungsfläche und verdeutlicht dessen gegensinnige Krümmung. Schnitt (b) veranschaulicht die Einschnürung der Säulen in der Mittelebene sowie die Interpretation der Wabenwandung als Regelfläche, die im Vertikalschnitt eine Gerade ausbildet, die der Spiegelachse aus Bild 4.09 entspricht. Schnitt (c) macht die konische Form der benachbarten Waben und den Wechsel der Wabenöffnungen deutlich. Der Werkstoff mäandriert sozusagen von einer Seite zur anderen.

Der Achsabstand der untersuchten Plattentypen entspricht einheitlich 25 mm, der Lochdurchmesser jeweils 20 mm. Der Hersteller begründet die Wahl ausschließlich dieser Abmessungen mit herstellungstechnischen Gründen. Es wird deutlich, dass Struktur und Fertigungsverfahren in direktem Zusammenhang stehen. Nur durch Umformung eines fließfähigen Werkstoffs lässt sich exakt diese räumliche Struktur herstellen. Die gezielte Bereitstellung von Wärme und Druck in Verbindung mit den

rheologischen Eigenheiten des Materials „Polycarbonat“ diktieren die differenzierte Werkstoffverteilung sowie die geometrische Genauigkeit der Struktur über die Kernhöhe. Aufgrund der hohen Fertigungsanforderungen treten entsprechend Fehler sowie Abweichungen bei Begutachtung verschiedener Chargen auf.

4.2.1.3 Der 3D-Wabenkern als Tragstruktur

Die Struktur des 3D-Wabenkerns lässt sich mit einem dreiecksförmigen Trägerrost vergleichen, bei dem die von den Ober- und Untergurten aufgespannten Dreiecke in den Ober- und Unterebenen jeweils wechselseitig ausgefüllt sind. Die Analogie zu einem Trägerrost in Bild 4.11 zeigt die horizontalen Kern-Außenseiten als flächige Ober- und Untergurte, die „Säulen“ als Vertikalstreben und die Wabenwandungen als vertikal aussteifende Scheiben bzw. Diagonalstäbe. „Säulen“ und Wandungsflächen bilden die durchgängige Verbindung der Ober- und Untergurte zueinander und sorgen durch ihre Querorientierung vor allem für eine hohe Quersteifigkeit E_z . Löst man wie in Bild 4.12 gezeigt die Dreiecke in der Fläche jeweils in Y-förmige Stabwerke auf (blaue Markierung), so ergibt sich ein räumliches Fachwerk mit hexagonalem Raster, das aber prinzipiell gleichwertig funktioniert. Die Wabenwandungen erhalten aufgrund der Y-förmigen Stabwerkskonfiguration eine räumliche Krümmung, die der in Bild 4.09 gezeigten Geometrie entspricht (die Bögen sind hier jedoch Y-Abschnitte). Bild 4.13 zeigt sehr deutlich, dass sich die tatsächliche Wabenstruktur konstruktionsmorphologisch zwischen Bild 4.11 und 4.12 einstellt.

Die Wabenwandungen bilden nach Bild 4.14 geschlossene Zellstrukturen, die sich gegenseitig stabilisieren. Je höher der Kern, desto schlanker und ebener wird die Wandungsfläche bei gleichbleibender Wandungsdicke. Es ist zu vermuten, dass dies zu einer erhöhten Knickgefährdung der Wandung führt und eine Reduzierung der Quersteifigkeit bewirkt. Bild 4.07 zeigt die fertigungsbedingte Konzentration des Werkstoffs im Bereich der Außenseiten, was zu einer hohen geometrischen Steifigkeit beiträgt. Vor dem Hintergrund zunehmender Schlankheitsgrade der Wandungsflächen scheint aber die Frage berechtigt, in welchem Verhältnis die geometrische Steifigkeit mit der Kernhöhe zunimmt. Dieser Fragestellung wird unter anderem in Kapitel 4.1.2 nachgegangen.

Es wird außerdem deutlich, dass sich keine harten Kanten zwischen den Wandungen, den Säulen und den Kon-

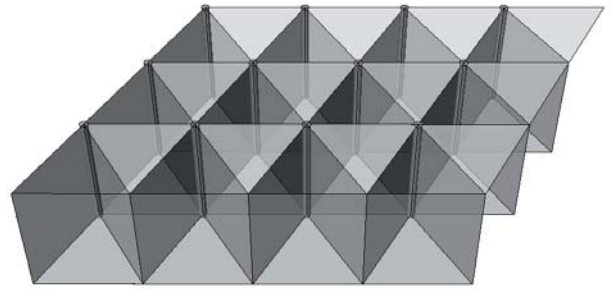


Bild 4.11: Tragwerksanalogie zu einem Trägerrost mit wechselweise ausgefüllten Ober- und Untergurtzonen

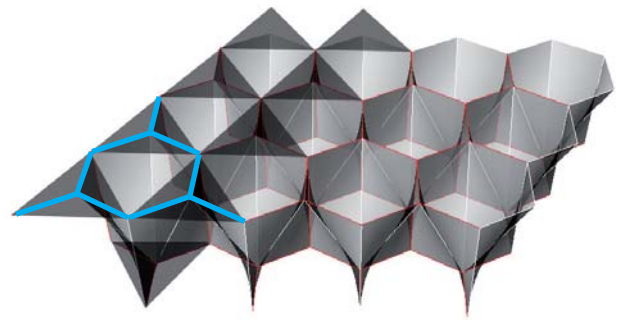


Bild 4.12: Tragwerksanalogie aus Bild 10 mit y-förmig aufgelösten Ober- und Untergurtzonen (Dreiecke aus Bild 10 linkerseits überlagert)

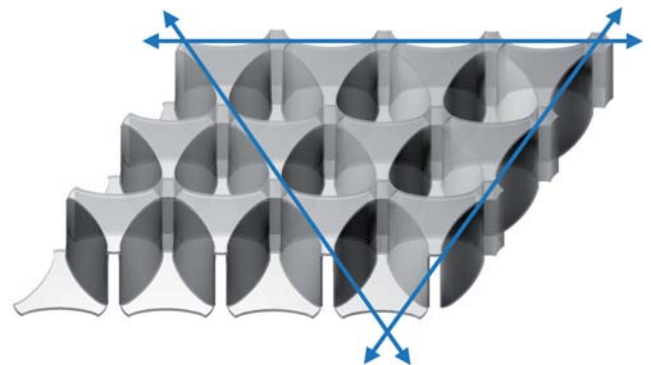


Bild 4.13: Gleichwertige Spannrichtungen des 3D-Wabenkerns

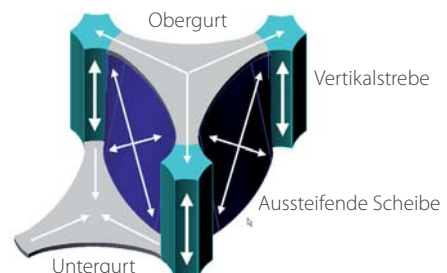


Bild 4.14: Digitales Modell des 3D-Wabenkerns: dreiecksförmige Ober- und Untergurtzonen (Kontaktflächen), Vertikalstreben (Säulen), aussteifende Scheiben (Wabenwandungen)

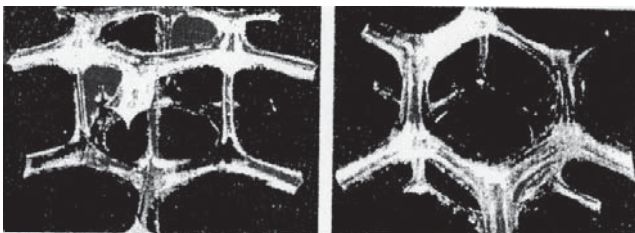


Bild 4.15: Silikatskelett einer Kieselalge/Diatomee (nach T. Noser 1983)

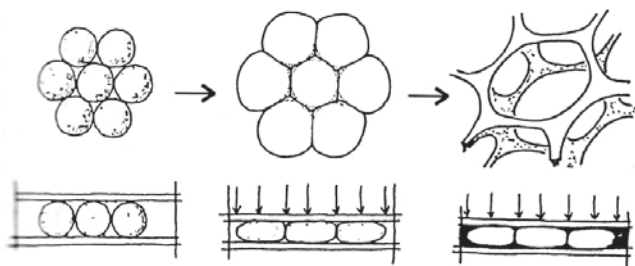
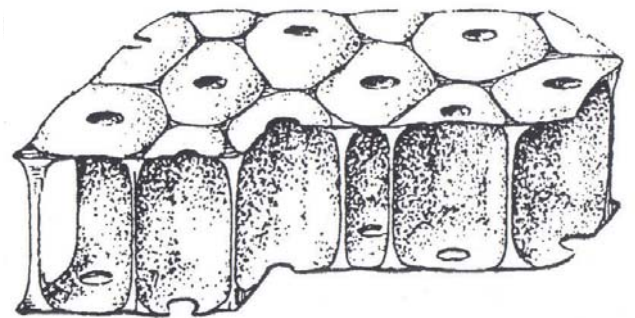


Bild 4.16: Ausformungen aufgrund „Raumkonkurrenz“ nach dem Diatomeen-Prinzip: Betonausgusschalen im Selbstversuch (a), Strukturprinzip (b), Herstellungsprinzip (c), nach T. Noser 1983

taktflächen ausbilden. Aufgrund des kontrollierten thermischen Umformvorgangs entstehen weiche Übergänge, die ebenfalls die Stabilität positiv beeinflussen und die Kernstruktur vor allem unempfindlicher gegenüber Kerbspannungen machen.

Die triangulierte Kernstruktur verfügt folglich über drei gleichwertige Spannrichtungen, die jeweils um 60° zueinander und jeweils in Achse der Wabenwandungen orientiert sind (Bild 4.13). Die Trageigenschaften sind in diesen drei Richtungen jeweils identisch und verleihen der Sandwichstruktur so ihren ungerichteten Charakter. Die Waben liegen in diesen Hauptrichtungen jeweils gereiht hintereinander. Rechtwinklig zu diesen Hauptrichtungen liegen die Waben im Versatz zueinander. Geeignete Versuche werden klären, ob und in welchem Ausmaß die Trageigenschaften dieser Richtung zu den genannten Hauptrichtungen abweichen.

4.2.1.4 Prozeßbedingte Analogien zu Strukturformen aus Natur und Technik

In diesem Abschnitt soll der 3D-Wabenkern in Beziehung zu strukturverwandten Formen aus Natur und Technik gesetzt werden. Im Mittelpunkt steht dabei weniger die Suche und Gegenüberstellung ähnlicher Konstruktions-typen, sondern das Aufzeigen von Herstellungs- und Bildungsprozessen in Natur und Technik, die zu vergleichbaren Strukturformen führen und welche Prozeßparameter dafür verantwortlich sind. In der Natur sind die Bildungsprozesse evolutionstechnisch daraufhin ausgelegt, möglichst effiziente Konstruktionen im Sinne von Leichtbaustrukturen hervorzubringen. Während der Recherche sind drei wesentliche prozeßrelevante Entsprechungen deutlich geworden:

- Selbstbildung aufgrund von Druckunterschieden

Nach [men01] gilt das fasergestützte weiche Pneu als Urkonstruktion des Lebens. Es besteht eine gewisse Struktur-analogie des 3D-Wabenkerns zur Schalenkammerung von Kieselalgen (Bild 4.15): Kugelförmige Fettbläschen drücken sich durch pneumatischen Druck gegenseitig in eine hexagonale Struktur, dessen Zwischenräume sich mit Kieselsäure ausfüllen und aushärten.¹ Bei der Bildung des

1

[nac03] S.131: „Fetttröpfchen-Hypothese“ nach G.Helmcke als heuristisches Erklärungsprinzip für das Zustandekommen der feinen Schalenkammerung von Diatomeen, welches sich jedoch als nicht exakt genug erwiesen hat (Nachtigall 2003)

3D-Wabenkerns führen ebenfalls pneumatische Zustände zu definierten Zwangslagen des Werkstoffs. Diese resultieren jedoch nicht aus einer „pneumatisch“ geformten Hilfsschalung, sondern durch direkte pneumatische Umformung des Endwerkstoffs, der durch vorheriges Erwärmen erst formbar wird. Die finale „Härtung“ erfolgt durch kontrolliertes Abkühlen des Polycarbonats.

- Definierte Zwangslagen durch Raumkonkurrenz

Die durch dichte Aneinanderreihung kugelförmiger Bläschen bedingte Raumkonkurrenz bewirkt die charakteristische hexagonale Ausformung natürlicher Strukturformen wie zum Beispiel bei den Silikatskeletten von Kieselalgen oder Bienenwaben (Bild 4.17). Bild 4.16 zeigt künstliche Ausgußformen nach Helmcke/Noser², die das Bildungsprinzip aufgrund Raumkonkurrenz von pneumatisch gestützten Füllkörpern deutlich machen. Die Ausfüllung der Zwischenräume führt zu ähnlichen Strukturformen wie beim 3D-Wabenkern: Die „Säulen“ sind an den Platten-Außenseiten verdickt, in der Mitte weisen sie hingegen den geringsten Querschnitt auf. In den Oberflächen bewirken die Füllkörper kontinuierliche Dreiecksstrukturen mit bogenförmigen Rändern. Bei Fertigung des 3D-Wabenkerns entsteht die Raumkonkurrenz durch den definierten Versatz der Aluminium-Lochplatten. Es bilden sich jedoch keine rein prismatischen Kammern aus wie bei den Ausgussformen, sondern konische Waben, da der pneumatische Druck wechselseitig von außen aufgebaut und nicht systemimmanent durch die Füllkörper erzeugt wird. Die finale Struktur bildet sich auch nicht skelettförmig, sondern flächig und werkstoffdurchgängig aus. Es werden keine Hohlräume zwischen trennenden Füllkörpern ausgefüllt, sondern der Werkstoff wird direkt in die Zwangslage gedrückt.

- Umformung viskoser Massen

Bild 4.18 zeigt die Formenanalogie zwischen dem 3D-Wabenkern (a) und dreidimensionalen Zugnetzen, die durch Auseinanderziehen plastischer Massen entstehen. So bildet Honig zwischen zwei Glasplatten gezogene Spitzen aus (b), ebenso viskose Massen zwischen parallelen Trägerplatten. Das zähflüssige Material sammelt sich vor allem an den Trägerplatten an und schnürt sich in der Mitte ein (c). Nach diesem Selbstbildungsprinzip entstehen in der Natur beispielsweise poröse Raumtragstrukturen

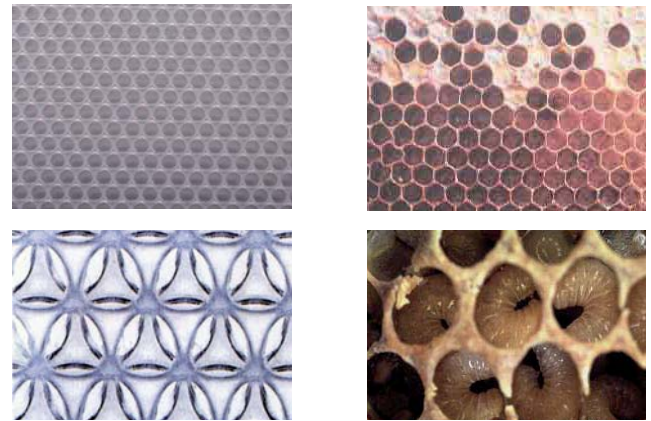


Bild 4.17: Formale Ähnlichkeit zwischen dem 3D-Wabenkern und Bienenwaben in der Fläche und in Vergrößerung

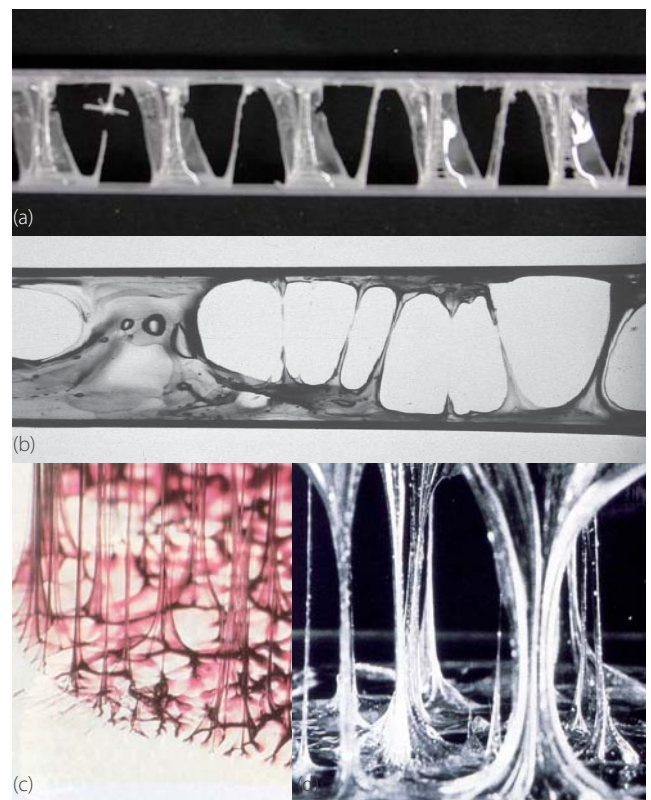


Bild 4.18: Prozessanalogie „Zugnetze pastischer Massen“: Schmalsschnitt durch 3D-Wabenkern (a), Honig zwischen zwei auseinandergezogenen Glasplatten (b), Gezogene Spitzen aus plastischer Masse (c), Blasen- und Säulenbildung z.B. bei der Knochenbildung oder auch erwärmten Gestein (d)

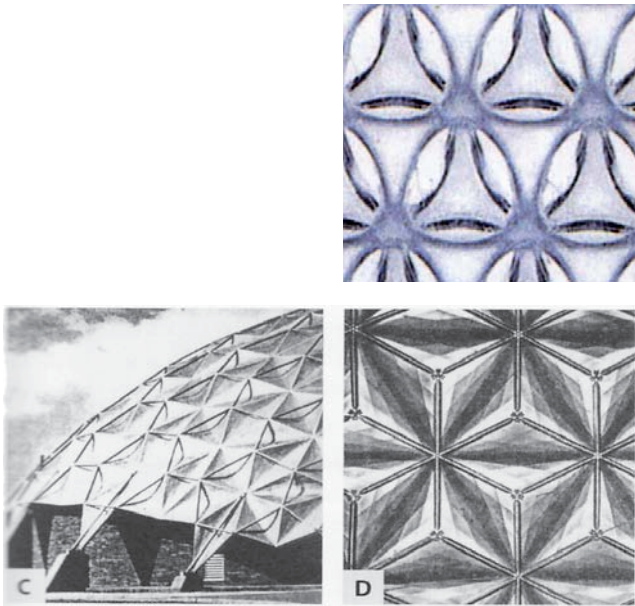


Bild 4.19: Hexagonalstrukturen: 3D-Wabenkern (oben), Hexagonales Stabtragwerk mit aussteifenden Blechen von G.Pawlow (unten), nach Nachtigall 2003

wie Knochen oder Knorpel (d). Dieses Bildungsprinzip ist auch Bestandteil des Fertigungsprozesses der 3D-Wabenplatte: Die Polycarbonatplatte wird durch Wärmeeinwirkung zu einer viskosen Masse, die auseinandergezogen wird und durch die Ausbildung gezogener Spitzen die in Kapitel 4.2.1.2 erläuterte Schichtdickendifferenzierung ausbildet.

Der Fertigungsprozess des 3D-Wabenkerns weist folglich Analogien zu drei in der Natur vorkommenden Bildungsprinzipien auf, wobei die technische Abwandlung und die gezielte Steuerung der physikalischen Prozessparameter zu einer „synthetischen“, künstlichen Form führen, die in genau dieser Form aber keine eindeutige konstruktionsmorphologische Entsprechung in der Natur findet. Der Vergleich zeigt jedoch, dass sich gerade thermoplastische Kunststoffe aufgrund ihrer guten Formbarkeit für die technische Applizierung der gezeigten Formbildungsgesetze besonders eignen und sich entsprechende Leichtbaustrukturen wie der vorliegende 3D-Wabenkern herstellen lassen.

In der Bautechnik werden hexagonale Stabtragwerke mit aussteifenden Scheiben aus dünnen Blechen vornehmlich für schalenförmige Strukturen, also Flächentragwerke verwendet. Bekannt sind entsprechende Schalenkonstruktionen von G.Pawlow³ oder R. Buckminster Fuller⁴ (Bild 4.19), die ungerichtete Stabwerke für Flächentragwerke verwendet haben. Durch gefaltete Anordnung der mittragenden Bleche bildet sich auch eine statische Höhe aus, die die Schale gegen Beulen stabilisiert. Die strukturelle Analogie des 3D-Wabenkerns vor allem in Bezug auf die Tragwerksanalogie in Bild 4.11 ist offensichtlich.

4.2.2 Statisch-konstruktive Untersuchung der Kernschicht

In Ergänzung zur geometrischen Analyse des 3D-Wabenkerns wird eine statisch-konstruktive Untersuchung der Kernstruktur vorgenommen, bei der die in Kapitel 4.2.1.3 gemachten Aussagen zur Tragfunktion belegt werden sollen.

3 [nac03] S.143

4 [kra99] S.382f.

4.2.2.1 Tragverhalten bei Biegung und Druck

In der geometrischen Analyse der Kernschicht ist festgestellt worden, dass die Wabenstruktur in morphologischer Hinsicht einem räumlichen Fachwerkrost mit drei Spannrichtungen gleicht. In Biege- und Druckversuchen soll das Tragverhalten der Kernschicht unter den Belastungsszenarien Biegung und Druck gesondert untersucht werden.

Die Versuchsreihen werden analog zu den Versuchsbedingungen aus Kapitel 3.3 mit gleichen Prüfkörperabmessungen und Belastungsbedingungen durchgeführt und ausgewertet. Die Stärke des in den Versuchen verwendeten 3D-Wabenkerns orientiert sich an der Bauhöhe der getesteten 3D-Wabenplatte aus Kapitel 3 und beträgt ohne Deckschichten folglich 36 mm. So wird ein direkter Bezug zu den Versuchsergebnissen des Gesamtgefüges aus Kapitel 3.3.1.7 bzw. 3.3.2.7 ermöglicht.

- Beanspruchung auf Biegung

Zur Untersuchung einer möglichen Richtungsabhängigkeit der Struktur in bezug auf das Tragverhalten wurden zwei separate Versuchsreihen durchgeführt: zunächst wurde die Spannrichtung des 3D-Wabenkerns parallel zu seiner Hauptrichtung gewählt (Waben hintereinander in Reihe, siehe Bild 4.20). Danach wurde der Wabenkern quer zu seiner Hauptrichtung gespannt (Waben nebeneinander in Reihe, siehe Bild 4.21).

Das Last-Verformungsdiagramm in Bild 4.22 zeigt einen linearen Anstieg der Kraft-Dehnungskurven für beide Fälle. Die Prüfkörper zeigen ein nahezu linear-elastisches Verhalten, sie gehen nach Krafrücknahme in ihren Ursprungszustand zurück. In Bezug auf die aus dem Steigungsgradienten ermittelbare Gesamtsteifigkeit B ergibt sich eine Wertedifferenz von etwa 8% für die beiden Fälle, wobei der parallel zur Hauptrichtung spannende Wabenkern mit $B_{0, \text{Kern}} = 393 \text{ Nm}^2/\text{m}$ die höhere Gesamtsteifigkeit aufweist⁵. Dies ist vermutlich auf die Hintereinanderreihung der Waben in Spannrichtung zurückzuführen, da der Kraftfluß im Vergleich zur versetzten Wabenanordnung nicht ständig umgelenkt werden muß. Die Differenz ist aber vergleichsweise gering, sodass der Kernstruktur und damit allen Sandwichverbünden ein „quasi-istotropes“ Tragverhalten in der Fläche bescheinigt werden kann.

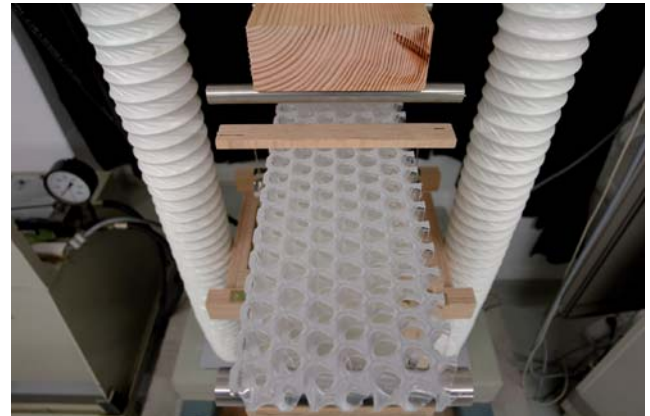


Bild 4.20: Biegeversuch 3D-Wabenkern, Spannrichtung entsprechend Hauptrichtung: „starke Achse“



Bild 4.21: Biegeversuch 3D-Wabenkern, Spannrichtung quer zur Hauptrichtung: „schwache Achse“

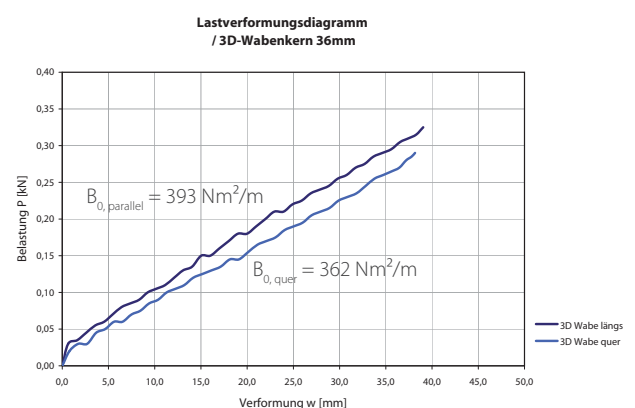


Bild 4.22: 3D-Wabenkern unter Biegebeanspruchung - Lastverformungsdiagramm für die zwei Spannrichtungen

5 vgl. Versuchsprotokoll „BK“ im Anhang S.xx

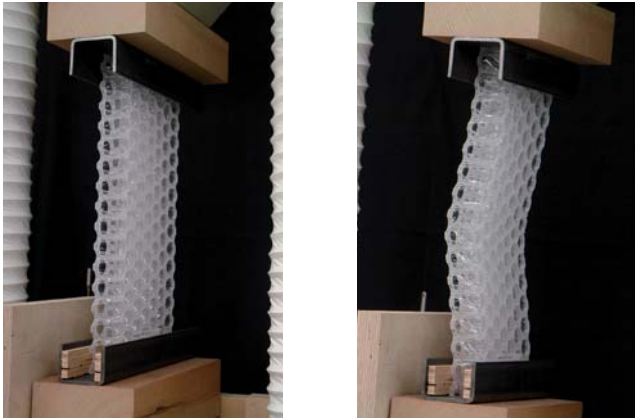


Bild 4.23: 3D-Wabenkern unter zentrischer Druckbeanspruchung - Seitliches Ausweichen

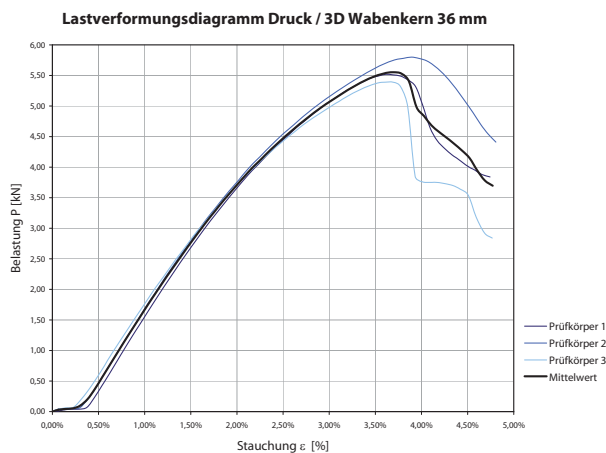


Bild 4.24: 3D-Wabenkern unter Druckbeanspruchung - Lastverformungsdiagramm

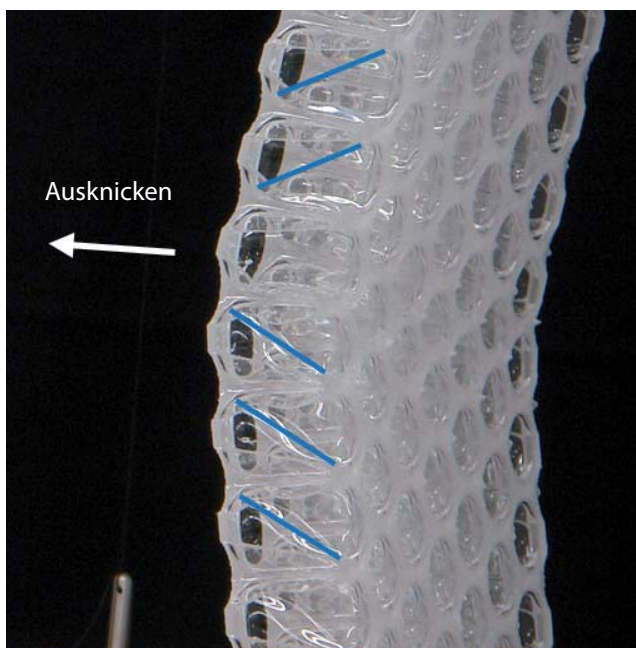


Bild 4.25: 3D-Wabenkern unter Druckbeanspruchung - Ausbildung von Zugdiagonalen (blau) und Beulzonen in den Wandungsflächen

Das Strukturgefüge zeigt vergleichbare Verformungserscheinungen wie im Sandwichgefüge (vgl. S. 90, Bild 3.50). In den äußeren, querkraftbeanspruchten Balkendritteln bilden sich Zugdiagonalen in den Wabenwandungen aus. Instabilitätsformen wurden nicht beobachtet.

Der Vergleich mit dem Gesamtgefüge (Kern+Deckschicht) aus Kapitel 3.3.1.7 führt zu folgenden Ergebnissen: das Flächengewicht der Kernschicht beträgt etwas weniger als die Hälfte, ist ohne Deckschichten relativ biegeweich und führt zu einer etwa 8,4 mal so starken Verformung wie beim Sandwichgefüge. Die Gesamtsteifigkeit der Kernschicht beträgt entsprechend nur ca. 12% des Sandwichverbundes. Dabei fällt auf, dass dieser aus Meßdaten ermittelte Wert in etwa der Differenz zwischen der Gesamtsteifigkeit und der reinen Biegesteifigkeit des Sandwichgefüges aus Kapitel 3.3.1.7 entspricht⁶:

$$\Delta B_{\text{Sandwich}} = B_{0, \text{Sandwich}} - E I_{\text{Sandwich}} = 3712 - 3321 = 391 \sim B_{0, \text{Kern}}$$

Der Kern beteiligt sich also durchaus an der Biegung im Gesamtgefüge, wenn auch in geringem Maße. Er führt im Sandwichverbund zu einer höheren effektiven Biegesteifigkeit als dessen theoretisch ermittelte Sandwichsteifigkeit, die nach Gl.(5), S.75 nur die Deckschichten erfasst und entsprechend geringer ausfällt. Die Schätzung des kernbezogenen Schubmoduls bestätigt den ermittelten Wert des Sandwichgefüges aus 3.3.1.7⁷.

- Beanspruchung auf Druck

Die Kernschicht wird parallel zu ihrer Haupttrichtung (Waben stehen übereinander) zentrisch belastet. Bei ca. 3 kN weicht die Kernstruktur kontinuierlich zur Seite aus. Auf der druckbeanspruchten Seite reißen auf mittlerer Höhe die Kontaktflächen im Bereich der Säulen mit lauten Knackgeräuschen. Die aufgerissenen Kontaktflächen werden bis Versuchsende bis zu 8 mm übereinandergeschoben. Aus diesem Grund ähnelt die Knicklinie nicht einer Welle nach Eulerfall 4, sondern nimmt eher eine dreiecksförmige Gestalt ein.

Durch die aus dem Knicken resultierenden Biegebeanspruchung stellen sich analog zu den Biegeversuchen in den Wabenwandungen Zugdiagonalen mit ihrer charakteristischen Parallelwellenform ein (Bild 4.23). Die Säulen

6 Werte aus Versuchsprotokoll „B07“, siehe Anhang S.

7 Werte aus Versuchsprotokoll „BK“, siehe Anhang S.

zeigen keine Verformungen in Querrichtung wie Stauchen oder Knicken. Das Stabilitätsverhalten in Querrichtung ist folglich weiterhin gut ausgeprägt.

Die Normkraftabtragung über die sozusagen als Deckschichten fungierenden Kontaktflächen funktioniert hingegen nur sehr eingeschränkt, ihr frühzeitiges Versagen (Bild 4.26) sorgt für die Gesamtinstabilität. Die Drucksteifigkeit beträgt nach Auswertung⁸ des Last-Verformungs-Diagrammes aus Bild 4.24 ca. 229 kN und damit erwartungsgemäß nur etwa 15% der Drucksteifigkeit des Gesamtgefüges aus Kapitel 3.3.2.7. Der Versuch zeigt noch einmal sehr deutlich, welche Rolle die Deckschichten für die zentrische Lastabtragung spielen, bei der der Kern rein stabilisierende Aufgaben erhält.

Die Untersuchungen der beiden Belastungsszenarien Biegung und Druck haben gezeigt, dass die Kernschicht für sich keine effektive Tragwirkung im Sinne einer Sandwichkonstruktion besitzt. Schwachstellen sind die unter Druck- und Zugspannungen stehenden Kontaktflächen, die als Deckschichten ungeeignet erscheinen. Die Versuche machen wiederum die hohe Quersteifigkeit sowie die Stabilisierungswirkung deutlich, die aus der kompakten Anordnung der konisch geformten Waben und deren gegenseitigen Aussteifung resultiert. Die Biegeversuche haben außerdem gezeigt, dass die Kernstruktur in allen Richtungen nahezu identische Trageigenschaften aufweist.

4.2.2.2 Kernhöhe und Tragverhalten

In der Versuchreihe B07, S.88ff. wurde der 3D-Wabenplatte eine günstige Tragwirkung bei Biegung besonders hinsichtlich seiner Stabilitätseigenschaften bescheinigt. In Ergänzung zu der bei dieser Versuchsreihe gewählten Ursprungsdicke von 40 mm wurden weitere Biegeversuche sowie Querdruckversuche mit 20 bzw. 80 mm hohen Sandwichstrukturen der gleichen Bauart durchgeführt (Bild 4.27), um den Einfluß der Kernhöhe auf das Tragverhalten zu untersuchen. Dabei wurde vor allem der Frage nachgegangen, in welcher Weise sich die unterschiedlichen Schlankheiten der Wabenwandungen bei Variation der Kerndicke auf die Gesamtstabilität der Sandwichstruktur auswirken und welchen Einfluß die Kernstruktur grundsätzlich auf die Gesamtsteifigkeit besitzt.

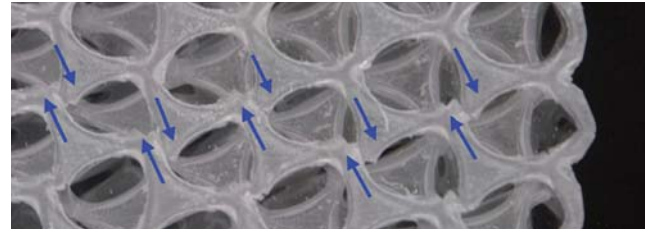


Bild 4.26: 3D-Wabenkern unter Druckbeanspruchung - Verschiebung der gebrochenen Kontaktfläche

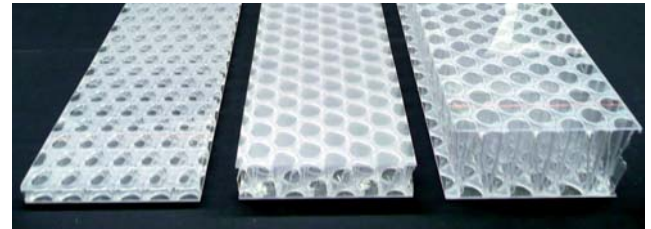


Bild 4.27: 3D-Wabenplatten mit gleichen Deckschichteigenschaften, aber unterschiedlichen Kernhöhen: Gesamtstärken v. links n. rechts: 20 mm, 40 mm, 80 mm

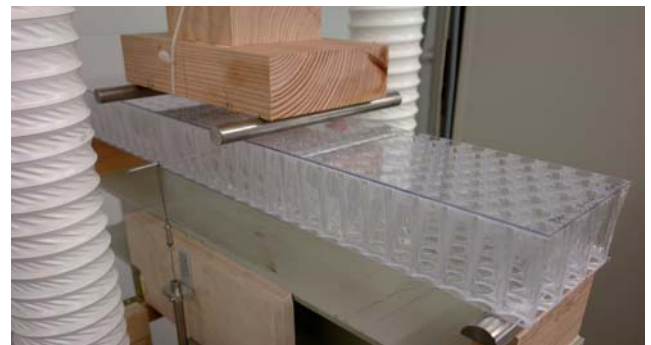


Bild 4.28: Biegeversuch der 80 mm starken 3D-Wabenplatte



Bild 4.29: Die Zugdiagonalen in den Wandungsflächen bilden sich durchgehend über mehrere Waben aus



Bild 4.30: Die druckbeanspruchte Deckschicht drückt in die Kernschicht ein und führt zum Versagen der 80 mm dicken 3D-Wabenplatte

⁸ vgl. Versuchsprotokoll „DK“ im Anhang S.xx

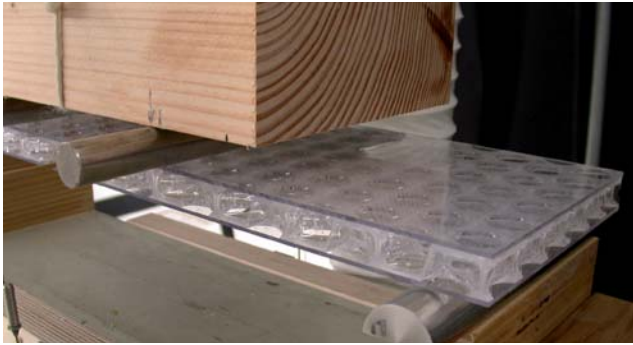


Bild 4.31: Biegeversuch der 20 mm starken 3D-Wabenplatte



Bild 4.32: Versagen der Schichtfuge auf der Zugseite und resultierendes Durchbrechen der Kernschicht

Bauhöhe [mm]	Rohdichte Kern [g/cm ³]	Ges. steifigkeit [Nm ² /m]	Versagensart
20	0,23	749	Bruch der Schichtfuge
x 2		x 4	
40	0,12	3299	kein Versagen
x 2		x 4	
80	0,07	11109	Eindrücken Kern

Bild 4.33: Bauhöhen, Kernrohichten und Gesamtsteifigkeiten im Vergleich

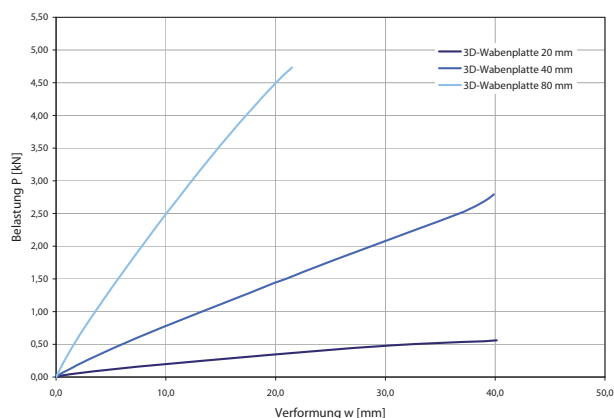


Bild 4.34: Lastverformungsdiagramm für 3D-Wabenplatten mit Gesamtdicken von 20 mm, 40 mm (übernommen aus B07) und 80 mm

- Einfluss der Kernhöhe bei Biegung

In einer ersten Versuchsreihe wurden analog zur Versuchsanordnung von B07 80 mm dicke 3D-Wabenplatten gleicher Abmessungen auf Biegung beansprucht. Bild 4.34 weist im Last-Verformungsdiagramm eine etwa viermal so hohe Anfangssteigung der Kraft-Dehnungslinie zur Referenzkurve der 40 mm dicken Platte auf. Die Kurve verläuft jedoch nicht linear, sondern leicht gekrümmt, was mit einer stetigen Abnahme der Steifigkeit einhergeht. Bild 4.29 zeigt erwartungsgemäß die charakteristische Ausbildung von Zugdiagonalen. Dieser Zustand stellt sich im Gegensatz zu B07 bereits sehr viel früher und extremer ein, was vor allem auf die höhere Schlankheit der Wandungsflächen zurückzuführen ist. Interessant erscheint dabei, dass die Zugdiagonalen einen ähnlichen Neigungswinkel wie bei B07 von ca. 45° aufweisen und über mehrere Waben verlaufen. Bei etwa 22 mm Verformung und einer Querbelastung von fast 5 kN knicken die Säulen und Wandungsflächen im Bereich der Drittelpunkte seitlich aus, die Deckschicht wird schlagartig in den Wabenkern gedrückt. Nach Rücknahme der Kraft relaxiert die Struktur nicht vollständig zurück, es verbleiben plastische Verformungen in den geknickten Säulen und Wandungsflächen. Auffällig erscheint jedoch der gute Zustand der geklebten Schichtfuge in diesen Bereichen, die nach visueller Begutachtung weitgehend intakt scheint.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde eine 20 mm dicke 3D-Wabenplatte gleicher Abmessung auf Biegung beansprucht. Die Steigung der Kraft-Dehnungslinie in Bild 4.34 beträgt nur etwa 25% der 40 mm dicken Referenzplatte aus B07 und attestiert der Platte damit eine entsprechend geringere Gesamtsteifigkeit. Die Platte verformt sich zunächst wie eine Vollplatte ohne Anzeichen örtlichen Instabilität. Alle drei Prüfkörper versagen aber vor Erreichen der Endverformung durch schlagartiges Ablösen der Deckschicht in der Zugzone. Das Versagen der Schichtfuge bewirkt eine direkte Verlagerung des Kraftflusses in die Kernschicht, die diese Belastung nicht aufzunehmen vermag und über die gesamte Breite durchbricht (Bild 4.32).

Die Werte der aus den Meßdaten ermittelten Gesamtsteifigkeiten in Bild 4.33 stehen zueinander im Verhältnis 1:4:16. Setzt man dieses Verhältnis in bezug zu der jeweiligen Kerndicke, so bestätigt sich Gl. (5) der Sandwichtheorie, in der die statische Höhe d im Quadrat eingeht, nicht wie bei einer Vollplatte in der dritten Potenz. Die Rohdichten der drei Plattenvarianten nehmen jedoch mit

steigender Bauhöhe ab, da die Kerne jeweils aus der gleichen Ursprungsplatte gefertigt sind.

Die Versuche haben gezeigt, dass die 3D-Wabenplatten gleicher Bauart, aber variabler Bauhöhe unterschiedliche Versagensarten aufweisen: die 20 mm Platte versagt in der Schichtfuge, die 40 mm Platte erreicht die Endverformung ohne Versagen, die 80 mm Platte hingegen versagt durch lokale Überschreitung der Quersteifigkeit. Im ersten Fall ist die Kernschicht vergleichsweise dicht, die Schichtfuge aufgrund der geringen Biegesteifigkeit jedoch stark beansprucht. Bei der 80 mm dicken Platte ist die gleiche „Menge“ Werkstoff auf die vierfache Höhe verteilt, die Strukturbestandteile des Kerns sind entsprechend schlanker und filigraner, was sich wie gezeigt nachteilig auf dessen Stabilisierungsvermögen auswirkt. Der 40 mm dicke Wabenkern weist offensichtlich eine günstige Verteilung des Werkstoffs im Kerngefüge auf, auch gegenüber den Deckschichten. Diese Erkenntnis wird bei den Optimierungsansätzen wieder aufgegriffen.

- Einfluss der Kernhöhe auf die Quersteifigkeit

In einer weiteren Versuchsreihe wird die Drucksteifigkeit des Kerns quer zur Mittelebene hinsichtlich unterschiedlicher Bauhöhen untersucht. Die Quersteifigkeit ist wie bereits in Kapitel 4.2.1 erwähnt ein wichtiger Indikator für die Stabilitätseigenschaft des Wabenkerns.

Hierzu wurden analog zu den gezeigten Biegeversuchen quadratische Prüfkörper der Kantenlänge 100 mm für die drei unterschiedlichen Bauhöhen angefertigt. Zur Analyse der Quersteifigkeit wurden je Plattentyp drei Prüfkörper quer zur Mittelebene kontrolliert gestaucht. Der Verfahrensweg betrug 5 mm pro Minute, die dafür notwendig aufzubringende Kraft wurde in Zeitintervallen von 10 Sekunden gemessen. Die resultierenden Last-Verformungsdiagramme für die einzelnen Plattentypen verschiedener Bauhöhe sind in Bild 4.39 dargestellt⁹.

Alle drei Prüfkörper weisen unter der Belastung anfänglich einen starken, weitgehend linearen Anstieg der notwendigen Kraft auf. Nach kurzer Zeit fangen die Wabenwandungen in der Mittelebene bereits an zu knittern, in der Folge drücken sich die Säulen in Kraftrichtung zusammen. Die einsetzende Instabilität bewirkt ein schlagartiges Abfallen der Kraft. Aufgrund der gegenseitigen Stabilisierung der Waben untereinander kommt es aber nicht zum seitlichen Ausweichen der Strukturbestandteile. Die Bilder 4.36 und 4.37 zeigen sehr deutlich, dass

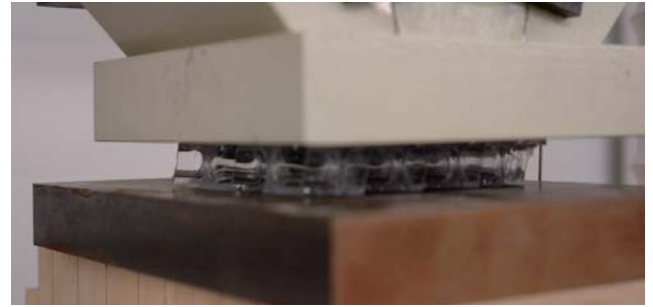


Bild 4.35: Querdrukversuch der 20mm dicken 3D-Wabenplatte



Bild 4.36: Querdrukversuch der 40mm dicken 3D-Wabenplatte



Bild 4.37: Querdrukversuch der 80mm dicken 3D-Wabenplatte

Bauhöhe [mm]	Kernhöhe [mm]	Rohdichte Kern [g/cm ³]	Drucksteifigkeit D [kN]	Modul E_z [kN/cm ²]
20	16	0,23	417	~ 4
40	36	0,12	1200	~ 12
80	76	0,07	630	~ 6

Bild 4.38: Bauhöhe, Kernrohichte und Drucksteifigkeit im Vergleich: E_z gibt den Druckmodul der Kernschichten in Querrichtung an.

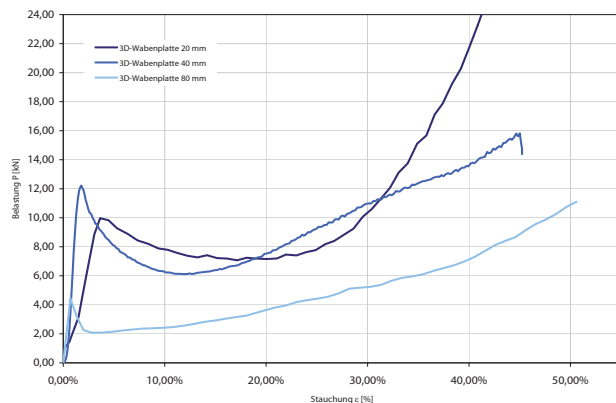


Bild 4.39: Drucksteifigkeiten und Lastverformungsdiagramm für 3D-Wabenplatten mit Gesamtdicken von 20 mm, 40 mm und 80 mm

Kerntyp	Rohdichte [g/cm ³]	Druckmodul E_z [kN/cm ²]	Schubmodul G_{xz} [kN/cm ²]
3D-Wabe 20 mm	0,23	~ 4	k.A.
3D-Wabe 40 mm	0,12	~ 12	~ 1,3
3D-Wabe 80 mm	0,07	~ 6	k.A.
Kunststoffschäume	0,10	~ 1 - 2,5	~ 0,5 - 2
Kunststoffschäume	0,20	~ 3	~ 1 - 5
Nomex-Papierwabe	0,02	~ 20	~ 2,5 - 6,5
Alu-Honigwaben	0,10	~ 250	~ 25 - 55

Bild 4.40: Vergleich des 3D-Wabenkerns mit anderen Kernfüllungen aus Bau, Automobil- und Luftfahrzeugbau, Werte der 3D-Wabe nach eigenen Messungen, sonstige Werte nach [kle05] S.195

die beschriebene Instabilität mit der Zeit zu einer plastischen Verformung des Polycarbonats in der Mittelebene der Platte führt. In dieser Zone weisen die Säulen und Wandungsflächen auch ihre geringsten Querschnitte auf. Der Stauchungsvorgang führt zu einer Kompaktierung des Werkstoffs in der Mittelebene. Dieser Effekt führt allmählich zu einer erneuten Versteifung des Gefüges und bewirkt bei fortgeschrittener Stauchung einen erneuten, jedoch verzögerten Anstieg der Kraft-Dehnungslinie. Dies bezieht sich grundsätzlich auf alle drei Bauhöhen.

Folgende Unterschiede wurden jedoch festgestellt: die aus der linear-elastischen Anfangsverformung ermittelten Drucksteifigkeiten⁹ sind in Bild 4.38 dargestellt und zeigen für den 40 mm starken Kern einen doppelt bzw. dreifach so hohen Wert gegenüber der 80 mm bzw. 20 mm dicken Kernschicht. Wie in Bild 4.39 zu erkennen ist, weist der 80 mm Wabenkern die höchste Knickgefährdung auf, da die Instabilität bereits bei etwa 4 kN auftritt. Der 20 mm Wabenkern verfügt über die geringste Quersteifigkeit, was unter anderem daran liegen mag, dass die Wabenwandungen strukturbedingt die größte Schrägstellung aufweisen und in Querrichtung weniger Kraft aufzunehmen vermögen. Interessant erscheint bei dieser Bauhöhe der starke Anstieg der Kraft ab ca. 25% Stauchung. Bezogen auf die Bauhöhe ist der Kern dann schon auf die Hälfte seiner Ursprungshöhe zusammengedrückt. Der Werkstoff wird regelrecht zu einem Vollquerschnitt zusammengeschoben (Bild 4.35).

4.2.3 Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass die Stabilitätseigenschaften weniger von der Kernhöhe, sondern vor allem von der geometrischen Struktur abhängen. Bei zu geringen Bauhöhen kann die Kernschicht ihre Stabilitätseigenschaften nicht voll entfalten, zu große Bauhöhen gehen mit einer erhöhten Knickgefährdung der Säulen und Wandungsflächen einher. Die 40 mm dicke 3D-Wabenplatte hat in beiden Versuchsszenarien gezeigt, dass sie im Vergleich zu geringeren und größeren Kernhöhen optimale Stabilitätseigenschaften aufweist. Ein Vergleich in Bild 4.40 zu anderen, durchgängig opaken Sandwichkernen aus Bau und Industrie zeigt, dass der 3D-Wabenkern etwas bessere statische Werte als Kunststoffschäume annimmt, gegenüber den Hightech-Kernwerkstoffen industrieller Anwendungen aber erwartungsgemäß weit

zurückbleibt. Die geometrische und statisch-konstruktive Untersuchung des 3D-Wabenkerns bestätigt dessen vergleichsweise gute Eignung als stabilisierende Schicht in transluzenten Sandwichstrukturen. Besonders hervorzuheben sind seine quasi-isotropen Trageigenschaften in der Fläche sowie dessen gute Stabilisierungseignung im Sandwichgefüge. Es wurde außerdem gezeigt, dass die vielfältigen Strukturparameter des Kerns aus dem komplexen Fertigungsprozeß resultieren.

4.3 Variation in der Kernschichtlage

Die Struktur des beschriebenen 3D-Wabenkerns resultiert wie gezeigt aus dem in Kapitel 4.1.1 gezeigten Geometrieprinzip, welches sich aus dem thermopneumatischen Fertigungsprozess ableitet. Die zugrundeliegenden geometrischen Fertigungsparameter nehmen bei dem vorhandenen Produkt bisher ganz bestimmte Werte und Abhängigkeiten ein, die zu der charakteristischen Form des triangulierten 3D-Wabenkerns führen. In diesem Abschnitt sollen Ansätze untersucht werden, in welcher Weise sich durch Modifikation dieser Parameter auch andere, gegebenenfalls optimalere 3D-Wabenstrukturen hinsichtlich seines statisch-konstruktiven Potentials realisieren ließen. Im wesentlichen bestimmen stereometrische Lage und Perforationsgeometrie der zur Herstellung notwendigen Aluminiumplatten die Struktur des Wabenkerns. Diese Tatsache gibt den möglichen Aktionsradius der Variation vor. Da eine direkte Herstellung von alternativen Kernstrukturen nicht möglich ist, wurden die geometrischen Fertigungsparameter in digitalen Modellen unter Zuhilfenahme parametrischer CAD-Software wie „Generative Components“ und „Rhinceros“ simuliert und alternative Wabenkerne als dreidimensionale Flächenstrukturen generiert. Zunächst wurde die Wabe als kleinste Einheit geometrisch modifiziert, in einem nächsten Schritt alternative Anordnungen der Waben zueinander untersucht. In einem dritten Szenario erfolgte die Kombination dieser beiden Varianten (Bild 4.41). Die CAD-Modelle wurden aus ABS-Kunststoff dreidimensional geplottet.

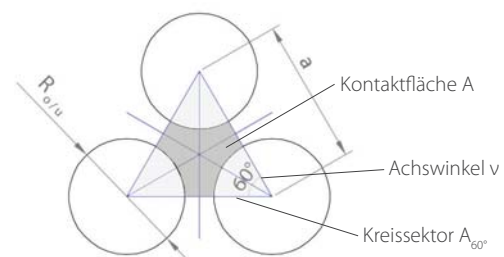
4.3.1 Variation der Wabengröße

Bild 4.42 zeigt die geometrischen Abhängigkeiten zwischen dem Wabenachsmaß a , den Wabenradien der Ober- und Unterseite $R_{o/u}$ für die vorhandene triangulierte Wabenstruktur wie in Kapitel 4.2.1 vorgestellt. Es wurde

Modifizierbare geometrische Parameter	Achsabstand a	Kreisradius oben R_o	Kreisradius unten R_u	Achswinkel v	Kernhöhe d_k
Szenario 1, 2, 3					
1a. Wabendurchmesser oben/unten synchron variieren	0	+/-		0	0
1b. Wabendurchmesser oben/unten unterschiedlich variieren	0	+/-	+/-	0	0
2. Anordnung der Waben variieren	+/-	0	0	+/-	0
3. Kombination aus 1 und 2	0	+/-	+/-	+/-	0

Bild 4.41: Simulationsszenarien und Eingabeparameter für die Erstellung der digitalen Modelle

- +/- Parameter wird variiert
0 Parameter bleibt konstant



Kontaktfläche A = dunkelgrau markierte Fläche
Bezugsfläche A_Δ = (gleichseitiges) Dreieck

Kontaktflächenanteil

$$A/A_\Delta = 1 - \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{R_{o/u}}{a} \right)^2$$

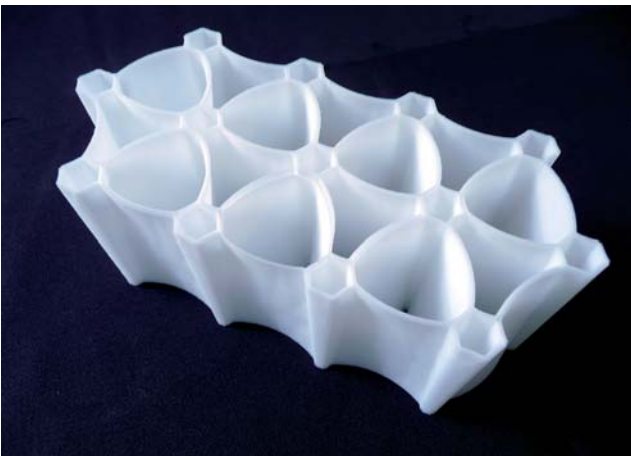
Bild 4.42: Wabenkern mit Dreiecksstruktur: Kontaktflächenanteil in Abhängigkeit des Wabenradius $R_{o/u}$ und des Waben-Achsmaßes a

Bild 4.43: Szenario 1a - Wabendurchmesser maximal: $R_o = R_u = a/2$

(Modell zeigt nur Wabenwandungen und Säulen)

Bild 4.44: Szenario 1a - Wabendurchmesser kleiner: $R_o = R_u \ll a/2$

(Modell zeigt nur Wabenwandungen und Säulen)

Bild 4.45: Szenario 1b - Wabendurchmesser unterschiedlich: $R_o \neq R_u < a/2$

(Modell zeigt nur Wabenwandungen und Säulen)

ein entsprechendes 3D-Modell mit der Software „Generative Components“ erstellt und die genannten Parameter als veränderbare Größen gemäß Bild 4.41 definiert. Die Kernhöhe wurde als Konstante festgelegt. Folgende Abhängigkeiten auf Grundlage des thermopneumatischen Herstellungsprozesses zwischen den Parametern wurden in der Software definiert:

- Ausbildung Kontaktfläche nur, wenn: $0 < R_o, R_u < a/2$

- Ausbildung Wabenwandung nur, wenn: $R_o + R_u > s$

In einem ersten Szenario (1a) wurden die Wabenradien der Ober- und Unterseite synchron variiert ($R_o = R_u$). Bild 4.43 zeigt den Extremfall, wenn R_o und $R_u = a/2$. Der Kontaktflächenanteil nimmt ein theoretisches Minimum von 9% nach der Gleichung in Bild 4.42 ein. Die Säulen würden sich zu einer schmalen Stoßlinie der jeweils sechs ankommenden Wabenflächen reduzieren. Die gezeigte Form stellt die materialreduzierteste Variante mit den größten Waben dar. Die Quersteifigkeit wird aber abnehmen, da die Säulen sehr schlank werden. Die Wabenwandungen erhalten eine größtmögliche Krümmung, was sich auf den Querkrafttransport wiederum positiv auswirkt. Da die Flächen alle auf einen Punkt laufen, wird dieser Bereich sehr anfällig für Kerbspannungen sein und die Gesamtstabilität der Kernstruktur bereits bei der thermopneumatischen Herstellung einschränken.

In einem zweiten Szenario (1b) wurden die Radien der Waben synchron reduziert (Bild 4.44). In dem geplotteten Modell wurden bewusst die Kontaktflächen weggelassen, um Säulen und Wabenwandungen sichtbar zu machen. Es zeigt eine Verdickung der Säulen als sechseckige Prismen. Die Wabenöffnungen werden kleiner, die Krümmungen der Wabenwandungen nehmen ab. Der Kontaktflächenanteil würde im Quadrat zunehmen, was sich auf den Deckschichtverbund positiv auswirkt. Die Breiten der Säulen werden in der Realität im Fertigungsprozess jedoch immer beschränkt bleiben, da ja nur Material einer dünnen Platte zur Verfügung steht, das auf eine größere Höhe auseinandergezogen wird.

In einem dritten Szenario (1c) wurden die Wabenradien unterschiedlich variiert ($R_o \neq R_u$). Wie Bild 4.45 zeigt, stellen sich konisch geformte Säulen ein. Man erhält folglich zwei unterschiedliche Strukturmuster auf der Ober- und Unterseite, die die Ausbildung abweichender Kontaktflächenanteile bewirkt. Aus statisch-konstruktiver Sicht

wird so eine Optimierung des Gesamtgefüges erzeugt. Je nach Deckschicht, Klebesystem oder statischer Beanspruchung wie zum Beispiel bei beulgefährdeten Deckschichten ließe sich die Kontaktfläche durch Reduzierung des Wabendurchmessers erhöhen und statisch-konstruktive Schwachstellen im Gesamtgefüge kompensieren. Gestalterisch ließen sich seitenbezogene „Kerndichten“ erzeugen, in dem man die 3D-Wabenplatten wechselseitig einbaut. Aus fertigungstechnischer Hinsicht dürfte diese Variation möglich sein, da lediglich Aluminiumplatten mit unterschiedlicher Perforation als Werkzeuge kombiniert werden müssten.

4.3.2 Variation der Wabenanordnung

Desweiteren wurde untersucht, welche optionalen Anordnungsmöglichkeiten die gegenseitig zueinander orientieren Waben vor dem Hintergrund der aus dem Fertigungsprozeß definierten Zwangslage zulassen. Das der 3D-Wabenplatte zugrundeliegende Dreiecksprinzip wurde in Frage gestellt, andere Polygone untersucht. Dabei wurde deutlich, dass eine alternative, regelmäßige Anordnung der Waben bei Berücksichtigung der parametrischen Abhängigkeiten nur in einem quadratischen Raster möglich ist. Fünfeckige Anordnungen sind geometrisch nicht möglich, hexagonale Anordnungen lassen sich auf das triangulierte System zurückführen.

Bild 4.47 zeigt eine Visualisierung der Quadrat-Variante. Alle Geometrieparameter der Ursprungsform des 3D-Wabenkerns wurden wertemäßig übernommen, lediglich der Achswinkel ν von 60° auf 90° erhöht. Es ergibt sich eine orthogonale Struktur, die ebenfalls gut funktioniert, jedoch nicht so dicht gepackt ist. Bild 4.46 setzt das Dreiecks- und Viereckssystem in Relation. Dabei fällt auf, dass das Viereckssystem nur zwei Hauptrichtungen aufweist und damit eine orthotrope Struktur in der Fläche darstellt. Es bildet sich ein im Vergleich zum Dreieckssystem größerer Kontaktflächenanteil aus, der nach der Gleichung in Bild 4.47 bei ca. 48% gegenüber 35% bei der Dreiecksstruktur liegt. Es steht folglich effektiv mehr Kontaktfläche für einen Deckschichtverbund zur Verfügung, was grundsätzlich positiv zu bewerten ist. Die Krümmung der Wabenwandungen sind jedoch begrenzt, da die Waben nicht so kompakt wie im Dreieckssystem angeordnet werden können. Die Quersteifigkeit nimmt ab, da die Säulen zum einen schlanker sind und eine weniger dichte Anordnung aufweisen. In der Summe ist zu erwarten, dass

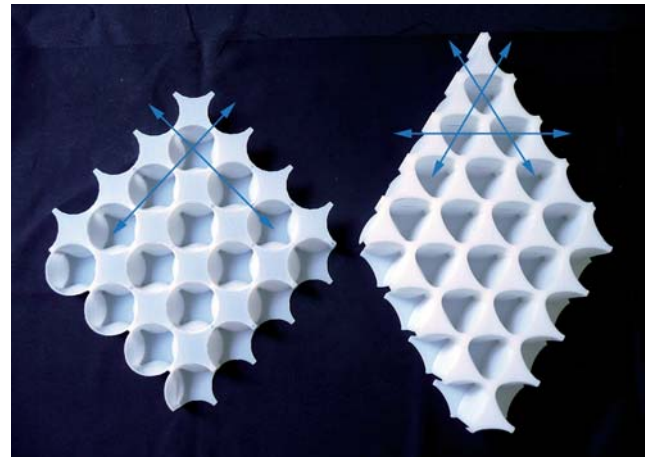
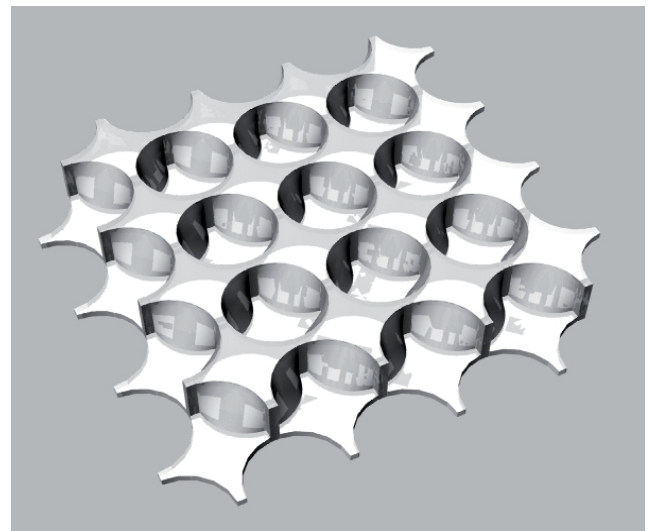


Bild 4.46: Gegenüberstellung der orthogonalen Kernstruktur zur bestehenden triangulierten Kernstruktur mit Hauptrichtungen (blau)



Kontaktflächenanteil (a = Achsmaß des quadratischen Wabenrasters)

$$A/A_\Delta = 1 - \pi \cdot \left(\frac{R_{o/u}}{a} \right)^2$$

Bild 4.47: Visualisierung eines orthotropen 3D-Wabenkerns nach gleichem Geometrieprinzip (Rhino), Ermittlung Kontaktflächenanteil

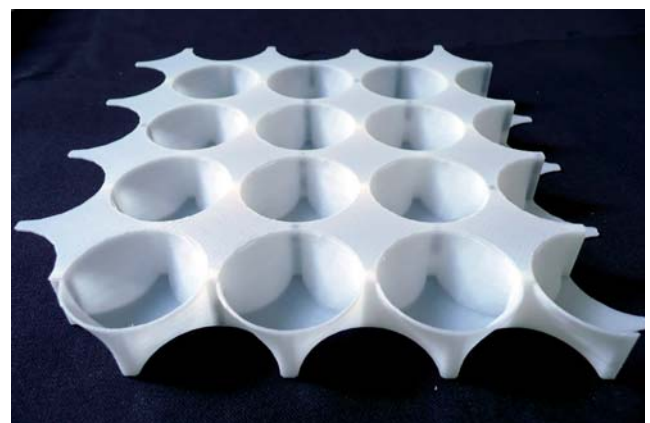
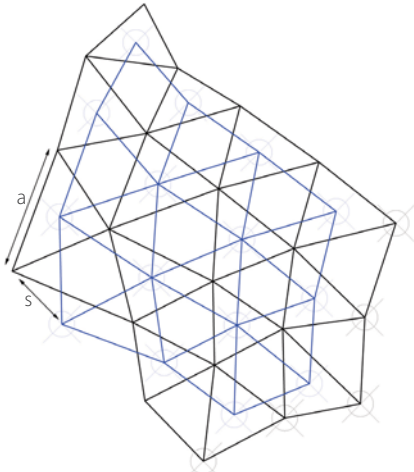
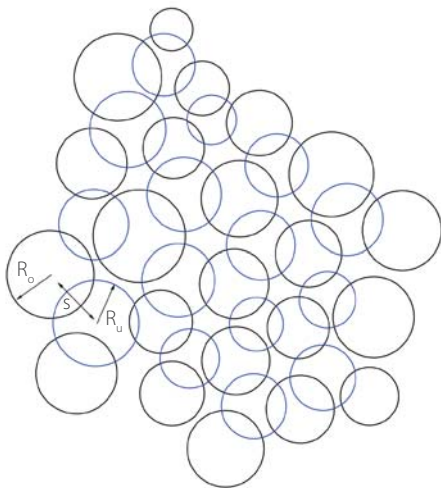


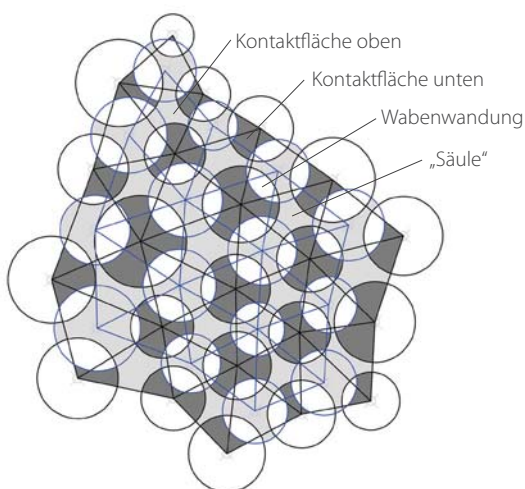
Bild 4.48: Plot des digitalen Modells aus ABS-Kunststoff ($R_o = R_u = 10 \text{ mm}$, $a = 25 \text{ mm} \rightarrow s = 17 \text{ mm}$, $\ddot{u} = 3 \text{ mm}$)



1. „Freie“ Dreiecksnetze der Ober- und Unterseite
Korrelation: Dreieckspunkte jeweils im Dreiecks-
Schwerpunkt der Gegenseite = Mittelpunkte Kreise



2. Kreise der Wabenöffnungen auf Ober- und Unterseite
Korrelation: Radien $R < \text{Dreieckskanten } a/2$



3. Kontaktflächen Oberseite (dunkelgrau) und Unterseite
(hellgrau), Wabenwandungen dazwischen

Bild 4.49: Aufsicht einer „freien“ Geometrie des 3D-Wabenkerns mit Zuordnung der bekannten Grundparameter a , s , R_o , R_u

sich in der gezeigten orthogonalen Wabenanordnung kein wesentlicher statisch-konstruktiver Mehrwert einstellt. Gestalterisch ergibt sich aber eine andere Wirkung. Aus fertigungstechnischer Sicht dürfte der Aufwand vergleichbar sein.

4.3.3 Kombinierte Variation von Wabengröße und Wabenanordnung

In einer dritten Studie führt die gleichzeitige Variation von Anordnung und Größe der Waben zu einer „freieren“ Strukturkonfiguration (Bild 4.49,1-3). Stereometrische Grundlage bildet aber weiterhin das Dreieckssystem. Es werden Dreiecksnetze auf den Ober- und Unterseiten mit unterschiedlichen Kantenlängen a und Achswinkeln v ausgebildet. Zur Sicherstellung der definierten Zwangslage mit Überschneidung der Kreise der Ober- und Unterseiten gelten aber weiterhin die Bedingungen wie bei 4.3.1. Die Kreismittelpunkte der Wabenöffnungen decken sich daher jeweils mit den Dreiecksschwerpunkten der Gegenseite (Bild 4.49, 1).

Bild 4.50 zeigt exemplarisch ein visualisiertes 3D-Modell. Die Struktur wirkt unregelmäßig. Je nach Kreisradien und Netzdichte ergeben sich Verdichtungen und Aufweitungen in der Struktur. Die Bedingungen der Zwangslage schließen sprunghafte Dichteänderungen aber aus und bewirken so weiche Übergänge. Die Dichte des Dreiecksnetzes bestimmt das Eigenschaftsprofil, zum Beispiel in Bezug auf den Lichtdurchlass, auf das Wärmedämmvermögen (Größe der Lufträume), und auf tragwerksrelevante Aspekte. Die Verteilung der Kontaktfläche zur Verklebung mit Deckschichten wird je nach Wabengröße- und anordnung gröber oder feiner. Eine Verdichtung ließe sich auch gezielt in lokalen Bereichen des Gesamtgefüges nutzen, wo eine erhöhte Querstabilität erfordert wird: in der Randzone erreichen Horizontalschub und Querkraft meist ihre Maximalwerte. Eine „kontrolliert“ unregelmäßige Kernstruktur könnte bei größeren Flächen auch gestaltprägend eingesetzt werden oder bereichsweise die Blickdichtigkeit bzw. die Lichtdurchlässigkeit und -streuung steuern.

Machbarkeit, Marktpotential und Verhältnismäßigkeit des Aufwands sind schwer einzuschätzen. Die Planung und Herstellung der unregelmäßig perforierten Aluminiumplatten könnte nur in einer digitalen Fertigungskette mit CAD/CAM-Technik erfolgen. Zudem erfordert die Generierung der Flächenstruktur wie in Bild 4.49 gezeigt

einen digitalen Algorithmus oder „Script“, das eine den jeweiligen Wünschen und Anforderungen entsprechend definierte „Dichteverteilung“ berücksichtigt. Dieses „Script“ könnte in einer parametrischen Software wie „Generative Components“ oder „Rhinceros“ entwickelt werden. Das Herstellprinzip selbst würde sich nicht wesentlich ändern, auch die Eignung von Polycarbonat als thermisch umformbarer Werkstoff stände weiterhin außer Frage.

4.3.4 Ergebnis der Kernvariation

Die geometrische Struktur des Kerns bietet wie gezeigt einen vielartigen, aber dennoch begrenzten Variationsreichtum, der bei gezielter Veränderung der geometrischen Parameter aus Kapitel 4.2 zu neuen Strukturen mit veränderten Eigenschaften führen kann. Die Ansätze haben gezeigt, dass grundsätzlich auch andere regelmäßige Strukturen wie abgewandelte Dreiecks- oder Orthogonalstrukturen nach dem analysierten Geometrieprinzip möglich sind und eine Umsetzung mit der bisherigen Herstellungstechnik und der Verwendung von transluzentem Polycarbonat realistisch erscheint. Eine „freie“ dreidimensionale Kerngeometrie birgt Potential sowohl in funktionaler, gestalterischer als auch statischer Hinsicht, ist aber in seiner Komplexität bezüglich Fertigung und Verwendbarkeit eher als Vision einzuschätzen.

Eine statische Untersuchung der virtuell generierten Strukturen wurde nicht durchgeführt. Es wären keine brauchbaren Aussagen zu erwarten gewesen, da die durch den Ziehvorgang bedingte Schichtdickendifferenzierung über die Kernhöhe bei der Generierung nur sehr aufwendig simuliert werden kann. Die Machbarkeit auch in Hinblick auf den Werkstoff Polycarbonat und die verfahrenstechnische Auslegung der für den thermopneumatischen Herstellungsprozess notwendigen Maschinen kann daher nur in Abstimmung mit dem jeweiligen Hersteller weiter untersucht werden. Erst dann könnten sich auch statische Untersuchungen nach Herstellung erster Prototypen anschließen.

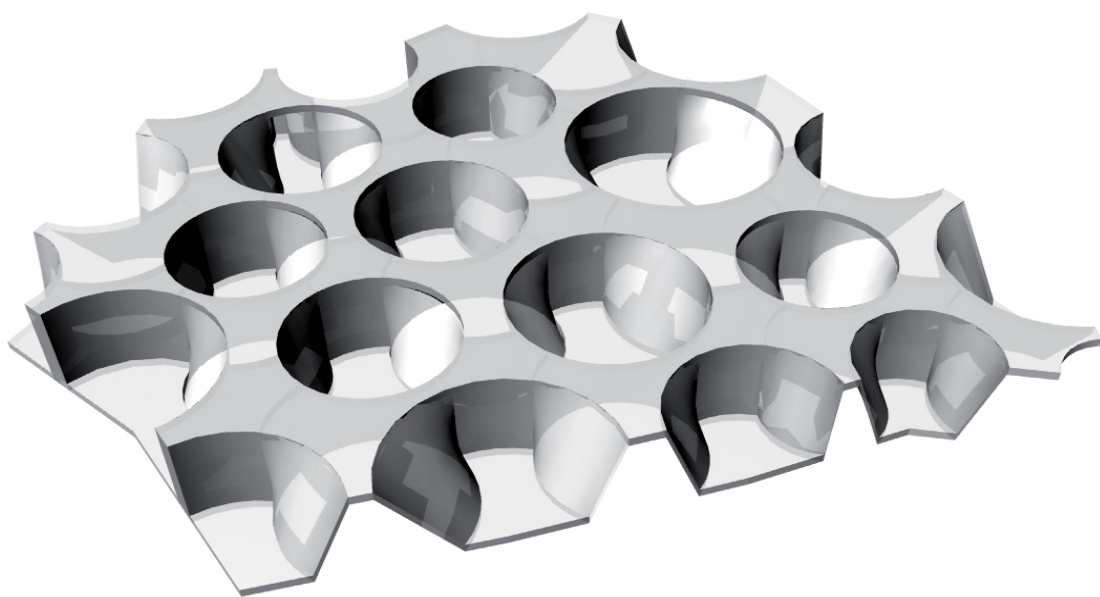


Bild 4.50: Visualisierung (aus Rhinceros) eines 3D-Wabenkerns mit „freier“ Anordnung, Lage und Größe der Waben, vgl. Grundrisse Bild 4.49

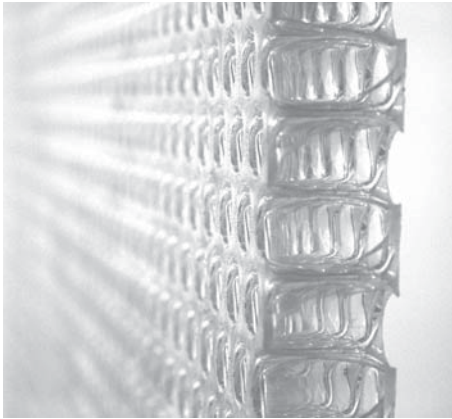


Bild 4.51: 3D-Wabenkern ohne Deckschichten

4.4 Variation in der Deckschichtlage

4.4.1 Zielsetzungen

Der Forderung nach festen und dehnsteifen Deckschichten und einem schubfesten, weichen Kern als Grundvoraussetzung für eine effiziente Sandwichkonstruktion wird durch die reine Verwendung thermoplastischer Werkstoffe nur ungenügend Rechnung getragen. So weist das Sandwichgefüge der 3D-Wabenplatte aufgrund der niedrigen Materialsteifigkeit und der begrenzten Festigkeiten der Polycarbonat-Deckschichten Optimierungsbedarf in diesem Bereich auf.

Wie in Kapitel 4.2 gezeigt wurde, verfügt der 3D-Wabenkern aus Polycarbonat jedoch über eine gute Eignung als statisch wirksame Kernschicht. Zur Verbesserung der Trageigenschaften ist daher zu überlegen, den thermoplastischen 3D-Wabenkern mit alternativen Deckschichtmaterialien zu kombinieren. Dehnsteifere Deckschichten würden es zudem ermöglichen, auch Dauerbelastungen aufzunehmen (thermoplastische Kunststoffe neigen zu Kriechverformungen unter Langzeitbelastung).

Der Austausch der Deckschichten ist in der Erwartung folgender, nicht nur statisch-konstruktiver Punkte begründet:

- Effizienzsteigerung in der Ausnutzung des Sandwicheffekts: Kern als leichter, schubsteifer Thermoplast – dünne Deckschichten aus hochfestem, dehnsteifem Material
- Erhöhung der Tragfähigkeit durch höhere Festigkeiten der Deckschichten
- Verbesserung des Verformungsverhaltens und der Stabilitätseigenschaften durch höhere Dehnsteifigkeiten der Deckschichten
- Optimierung der den Deckschichten zugeordneten Schutzfunktionen: Witterungsschutz vor Feuchtigkeit und Strahlung, Dauerbeständigkeit, Schmutzanfälligkeit, Brandschutz, Schallschutz
- Verbesserter Schutz des Polycarbonat-Kerns gegenüber äußeren Einwirkungen (UV-Schutz, Feuchtigkeit)
- Einfluß des Deckschichtmaterials auf die Gesamtgestalt des Sandwichgefüges aufgrund unterschiedlicher Lichtdurchlässigkeit, Farbigekeit, Oberflächenstruktur

Gegenstand dieses Abschnitts ist die Vorstellung geeigneter Deckschichtalternativen und deren Einfluß in konstruktiver, gestalterischer und funktioneller Hinsicht, die Auswahl materialgerechter Klebstoffe für den Schichtverbund sowie die praktische Untersuchung der neuen Sandwichverbunde hinsichtlich ihres statisch-konstruktiven Mehrwertes.

4.4.2 Alternative Deckschichtmaterialien

Zur Sicherstellung des transluzenten Charakters des Gesamtgefüges kommen als lichtdurchlässige Alternativen zu thermoplastischen Kunststoffen Glas und glasfaserverstärkte Kunststoffe mit transluzenter Harzmatrix in Frage.

Als Glaswerkstoff wird für die Vergleichsbetrachtung gewöhnliches Floatglas gewählt. Die Verwendung spezieller Glassorten wie zum Beispiel Einscheibensicherheitsglas oder vorgespanntes Glas wird bewußt ausgeblendet, um eine erste grundlegende Vergleichbarkeit im statisch-konstruktiven Zusammenwirken der Werkstoffe zu erhalten. Die genaue Spezifizierung des GFK-Werkstoffs begründet sich hingegen in der Grundanforderung, lichtdurchlässig zu sein. Entsprechende Eigenschaften besitzen Glasfaser-

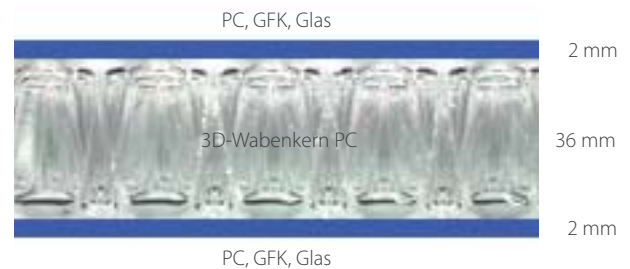


Bild 4.52: Austausch der Deckschichten bei Beibehaltung der Schichtdickenverteilung

		PMMA „Plexiglas“	Polycarbonat	GFK 30% „sobaglas“	Floatglas / ESG
Aufbau		Vollwerkstoff	Vollwerkstoff	30% Kurzglasfasern in transluzenter Polyester-Harzmatrix	Vollwerkstoff
Rohdichte	g/cm ³	1,2	1,2	1,7	2,5
Thermische Eigenschaften					
Wärmedehnzahl α_T	K ⁻¹	65×10^{-6}	65×10^{-6}	30×10^{-6}	9×10^{-6}
Wärmeausdehnung $\Delta T=50$ K	mm/m	3	3	1,5	0,5
Einsatztemperaturen	°C	-40 bis +90	-40 bis +135	-20 bis +80	-20 bis +250
Brandbeständigkeit	DIN 4102-1	B2	B1-B2	B1-B2	A1
Statische Eigenschaften					
Biegefestigkeit σ_B (Glas: f_{kt})	kN/cm ²	k.A.	k.A.	18 - 22 (Kurzzeitig)	4,5 / 12
Druckfestigkeit σ_D (Glas: f_{kt})	kN/cm ²	k.A.	k.A.	24 - 26 (Kurzzeitig)	50
Zugfestigkeit σ_Z (Glas: f_{kt})	kN/cm ²	7	7	10 - 15 (Kurzzeitig)	4,5 / 12
Elastizitätsmodul E	kN/cm ²	330 - 350	230	~ 800	7000
Sonstige Eigenschaften					
Schlagfestigkeit	kJ	0,8	192	100 - 120	0
UV-Durchlässigkeit	%	k.A.	> 0	> 0 (stark absorbierend)	0
Lichtdurchlässigkeit bei 4 mm Stärke	%	91	87	85% bei 1,5 mm	90
Wärmeleitfähigkeit λ	W/mK	0,18	0,21	0,18	1
Feuchtigkeitsaufnahme	%	0	0,2	k.A.	0

Bild 4.53: Technische Kennwerte lichtdurchlässiger Deckschichtmaterialien im Vergleich

Quellen: PMMA [Röh06], PC [Bay06], GFK30% [sco06], Glas [fue03]

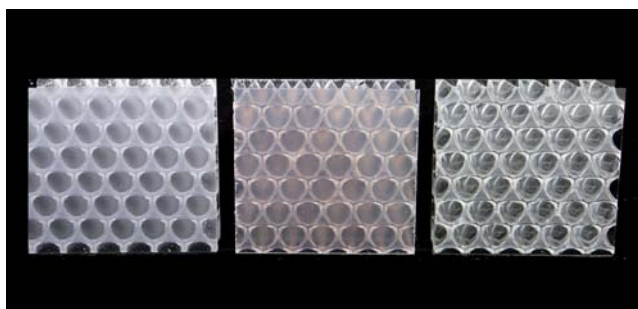


Bild 4.54: Kombination des 3D-Wabenkerns aus Polycarbonat mit unterschiedlichen Deckschichten (v.l.n.r.): Polycarbonat, GFK30%, Glas

Material Deckschicht	Gewicht Deckschicht 2 x 2 mm	Gewicht 3D-Wabenkern 36 mm	Summe
PC	2 x 57 g	100 g	205 g (100%)
GFK	2 x 72 g	100 g	240 g (117%)
Glas	2 x 108 g	100 g	316 g (153%)

Bild 4.55: Gewichtsvergleich bei Kombination des 3D-Wabenkerns aus PC mit unterschiedlichen Deckschichtmaterialien, Prototypabmessungen 150x150x40 mm

Aufbau	Gewicht [kg/m ²]
3D-Wabenplatte* mit 2 mm PC-Deckschichten	9,1
3D-Wabenplatte mit 2 (1,5) mm GFK-Deckschichten	10,7 (9,2)
3D-Wabenplatte mit 2 mm Glas-Deckschichten	14
Doppelverglasung bzw. Verbundglas 2 x 4 mm	19,2
Doppelverglasung bzw. Verbundglas 2 x 6 mm	28,8
Doppelverglasung bzw. Verbundglas 2 x 10 mm	48

Bild 4.56: Gewichtsvergleich zu üblichen Doppel- bzw. Verbundgläsern aus 2 Scheiben (Kerndicke 3D-Wabenplatte = 36mm)

verbünde mit 30% Anteil an ungerichteten Kurzglasfasern, eingebettet in eine transluzente Polyesterharz-Matrix (GFK30%). Solche Werkstoffe finden als Plattenware bereits praktische Anwendung im Baubereich, zum Beispiel für Verglasungen, Oberlichter oder lichtdurchlässige Verkleidungen. Als geeignetes Material findet das Produkt „scobaglas“¹ des Herstellers Scobalit für die weitere Betrachtung Verwendung.

Bild 4.54 zeigt Prototypen der neuen Sandwichverbunde mit Deckschichten aus GFK30% (Mitte) und Glas (Rechts) im Vergleich zu Deckschichten aus Polycarbonat (Links).

In Bild 4.53 sind die technischen Kennwerte von Floatglas und GFK30% „scobaglas“ den beiden transluzenten Thermoplasten PMMA und Polycarbonat gegenübergestellt. Im Vergleich zu PMMA und PC fällt auf, dass Glas eine etwa doppelt so hohe Rohdichte aufweist. Bild 4.55 zeigt die Gewichte der drei Prototypen aus Bild 4.54 im Vergleich. Das Flächengewicht des Sandwichverbundes ist unter Annahme gleicher Schichtdicke bei der Verwendung von Glas gegenüber Polycarbonat um 53% erhöht, bei der Verwendung von GFK nur um etwa 17%. Das Flächengewicht des Klebstoffs kann aufgrund seines verschwindend geringen Volumenanteils vernachlässigt werden. Gemäß Bild 4.56 zeigt das Glassandwich zu verschiedenen Doppel- bzw. Verbundgläsern jedoch ein vergleichbar geringes Flächengewicht, da die Stärken der Glasdeckschichten wesentlich geringer sind. Die Traglastversuche sollen zeigen, ob die durch die Verwendung von Glas resultierende Gewichtserhöhung eine Effizienzsteigerung des Sandwichverbundes in statisch-konstruktiver Hinsicht mit sich bringt.

Aus dem Vergleich der verschiedenen technischen Kennwerte aus Bild 4.53 lassen sich erste Erwartungen und Anforderungen an die alternativen Deckschichtmaterialien in konstruktiver, gestalterischer und funktionaler Hinsicht ableiten.

4.4.2.1 Erwartungen und Anforderungen bei Verwendung von Deckschichten aus GFK

- Konstruktive Aspekte

Gemäß Bild 4.53 verfügen die GFK-Deckschichten gegenüber dem PC-Wabenkern über eine halb so große Wärmeausdehnung, effektiv beträgt die absolute Differenz für $\Delta T = 50 \text{ K}$ etwa 1,5 mm. Die daraus resultierenden Zwängungen müssten durch den Klebstoff in der Schichtfuge aufgenommen werden. Folglich sollte ein Klebesystem ausgewählt werden, das über eine ausreichend hohe Flexibilität verfügt, um Eigenspannungen durch temperaturbedingte Zwängungen besser zu kompensieren. Zudem sind Klebesysteme zu bevorzugen, die ohne Wärmezufuhr verarbeitet werden können.

Die Materialsteifigkeit von GFK ausgedrückt durch den Elastizitätsmodul E ist um den Faktor 4 höher als der Wert von PC. Auch die Festigkeitswerte bei Druck und Zug liegen höher. Folglich ist eine wesentlich höhere Gesamtsteifigkeit und -festigkeit des Sandwichgefüges und damit eine effektivere Ausnutzung des Sandwicheffektes zu erwarten.

- Gestalterische Aspekte

Glasfaserverbunde mit etwa 30% Volumenanteil an kurzen, ungerichteten Glasfasern führen zu Lichtdurchlässigkeiten, die das Licht gut streuen, einen Durchblick aber nicht zulassen. Wie der mittlere Prototyp aus Bild 4.54 zeigt, ist das Erscheinungsbild des Verbundes vor allem durch die matte, rot-bräunliche Gestalt der vom Hersteller als „farblos“ bezeichnete GFK-Platte gekennzeichnet. Bei näherer Betrachtung zeichnen sich die Glasfasern im Schräglicht als bläulich schimmernde Linien ab. Wie Bild 4.58 zeigt, tritt die Wabenstruktur in ihrer Prägnanz aufgrund der reduzierten Lichtdurchlässigkeit etwas zurück, ist aber weiterhin wahrnehmbar. Objekte sind hinter dem Sandwichgefüge nur noch sehr schemenhaft zu erkennen.

- Funktionale Aspekte

Die Wärmedämmeigenschaften für eine gegebene Kernstärke wird durch die Verwendung von GFK als Deckschichtmaterial nur unwesentlich beeinflusst, da die Wärmeleitfähigkeit von GFK nur geringfügig besser ist als von Polycarbonat. Zudem sind die Schichtdicken für einen

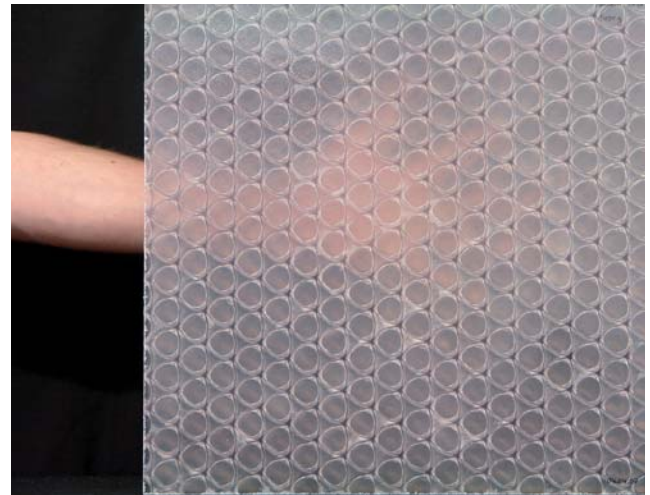


Bild 4.57: 3D-Wabenplatte mit GFK-Deckschichten

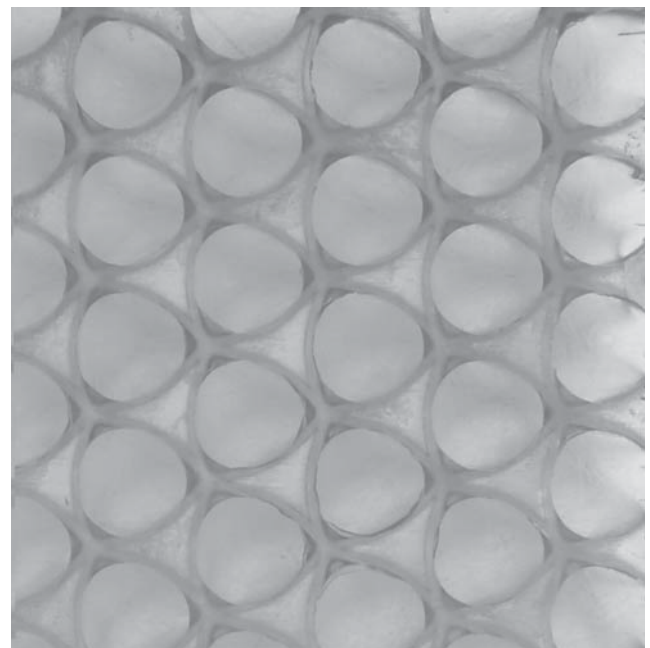


Bild 4.58: Nahaufnahme GFK-Deckschicht

Dämmeffekt zu gering. Entscheidend hierfür ist die Dicke der Kernschicht und die Abgeschlossenheit der Waben.

Der Schutz der Kernschicht sowie des Klebstoffs vor ultravioletter Strahlung bei Anwendung im Außenbereich setzt gerade in Hinblick auf die Dauerbeständigkeit die Ausstattung des GFK-Werkstoffs mit einem UV-Filter voraus. Es bewahrt die Harzmatrix vor Vergilben und schützt gleichzeitig die geklebte Schichtfuge. Das Produkt „sco-baglas“ ist laut Hersteller mit einer entsprechenden Oberflächen-Beschichtung ausgestattet, um die Harzmatrix dauerhaft zu machen.

Die Dauerbeständigkeit setzt auch die Dichtigkeit gegenüber Feuchtigkeit und anderen flüssigen und gasförmigen Medien voraus. Nach Zuschnitt der Deckschichten liegen an den Stirnseiten die Glasfasern teilweise offen. Um ein Eindringen von Feuchtigkeit in die Faserlage zu verhindern, müssten die Stirnseiten gesondert versiegelt werden, was einen zusätzlichen Arbeitsschritt bei der Herstellung und Verarbeitung entsprechender Sandwichverbünde darstellen würde.

Bezüglich der Feuerbeständigkeit sind keine Verbesserungen zu erwarten, da GFK wie PC nach DIN 4102-1 als „normal brennbar“ (B2) klassifiziert ist. Die vom Hersteller angegebene Einsatztemperaturen liegen gemäß Bild 4.53 sogar etwas unter den Werten von PC. Aus brandschutztechnischer Sicht ergibt sich folglich kein Mehrwert.

Die hohen Schlagfestigkeitswerte von PC erreicht das GFK nicht, im Vergleich zu anderen Werkstoffen wie PMMA oder Glas verfügt das Material nach Bild 4.53 aber über ein relativ gutes Verhalten gegenüber Stoßbeanspruchungen. Um ein Aufreißen der Schichtfugen infolge von Stößen zu verhindern, sollte das zu verwendende Klebesystem ebenfalls eine gute Schlag- und Stoßbeständigkeit aufweisen.

Die Rückführung des Gefüges in den Werkstoffkreislauf setzt die stoffliche Trennung der beiden Werkstoffe Polycarbonat und GFK voraus. Die GFK-Deckschicht kann nach Selbstversuch relativ einfach abgeschält werden, da der Klebstoff gegenüber dieser Beanspruchungsart keine ausreichende Festigkeiten aufweist. Während Polycarbonat als Rohstoff in der Kunststoffindustrie vollständig wiederverwendet werden kann, lässt sich GFK als Verbundwerkstoff jedoch nur thermisch verwerten.

4.4.2.2 Erwartungen und Anforderungen bei Verwendung von Deckschichten aus Glas

- Konstruktive Aspekte

Aus statisch-konstruktiver Sicht verfügt Glas grundsätzlich über sehr viel höhere Festigkeiten, gerade in Hinblick auf Druckbeanspruchungen. Wie Bild 4.53 außerdem zeigt, sind Dehn- und Drucksteifigkeit von Glas gegenüber Polycarbonat etwa um das 30-fache höher. Folglich ist mit einer wesentlich effektiveren Ausnutzung des Sandwicheffekts und damit entsprechend höheren Gesamtsteifigkeiten zu rechnen. In den Traglastversuchen wird zu klären sein, wie sich die verhältnismäßig geringe Biegezugfestigkeit von Floatglas (ca. 8% der Druckfestigkeit) auf das Tragvermögen des biegebeanspruchten Sandwichverbundes auswirkt.

Im Vergleich zu thermoplastischen Werkstoffen wie PMMA oder PC weist Glas eine sehr viel geringe Wärmeausdehnung auf, die auf Grundlage der gegenübergestellten Werte aus Bild 4.53 bei nur 12% gegenüber Polycarbonat liegt. Aufgrund dieser Diskrepanz sind Zwängungen im schubfesten Verbund mit dem PC-Wabenkern zu erwarten. Dieser Aspekt betreffe jedoch nur Außenanwendungen bzw. Anwendungen in der Gebäudehülle, bei denen extreme Temperaturschwankungen bzw. örtliche Temperaturunterschiede im Gefüge auftreten könnten. In diesen Fällen ist das Klebesystem durch Wahl eines hochelastischen Klebers auf entsprechende Extremfälle auszurichten, um eine Kompensation der aus Temperaturdehnungen resultierenden Eigenspannungen in der Schichtfuge zu ermöglichen.

Grundsätzlich ist aber zu erwarten, dass das Glas als wesentlich dehnsteiferer Werkstoff das temperaturbedingte Verformungsverhalten des Verbundgefüges in der Fläche diktiert. Das Sandwich lässt sich dann in diesem Zusammenhang durchaus als Glasbauelement begreifen.

Problematisch erscheint das Bruchverhalten von Glas. Floatglas zerbricht für sich meist spröde und schlagartig in scharfkantige schwertartige Scherben und Splitter, die eine große Verletzungsgefahr darstellen können (Bild 4.59). Die nachträgliche thermische Vergütung von Floatglasscheiben zu Einscheibensicherheitsglas (ESG) führt zu einem Bruchbild mit krümeliger Splitterung, die die Verletzungsgefahr erheblich reduziert (Bild 4.60), verbunden mit einer Erhöhung der Biegezugfestigkeit. Die Verwen-

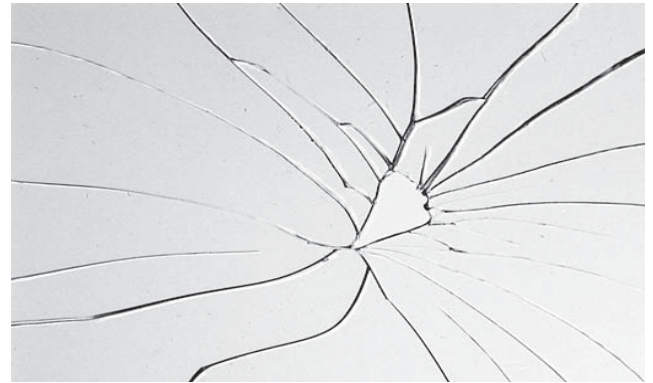


Bild 4.59: Typisches Bruchbild von Floatglas

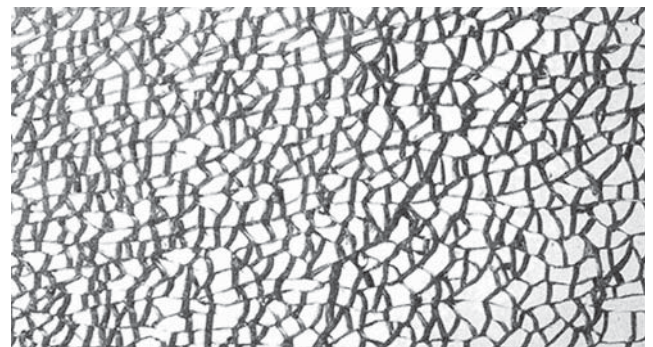


Bild 4.60: Typisches Bruchbild von Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG)

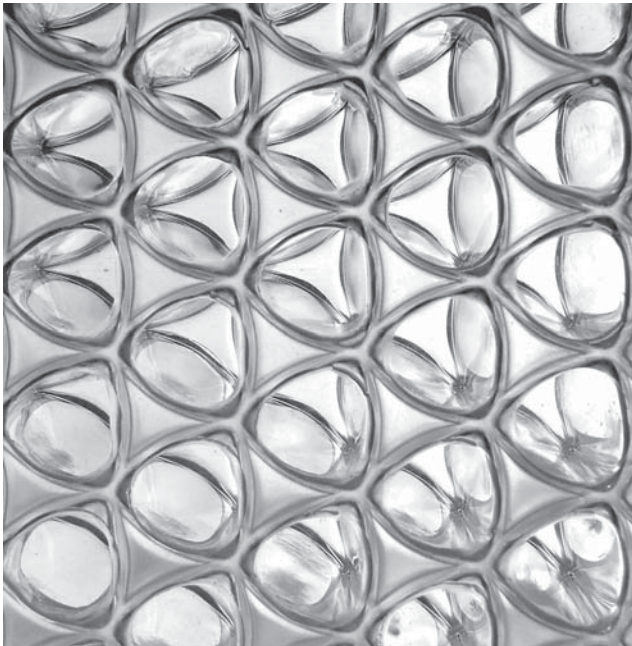


Bild 4.61: Nahaufnahme des Prototyps mit Glasdeckschichten



Bild 4.62: Gestalt einer 3D-Wabenplatte mit Glasdeckschichten

derung von Spezialgläsern wie ESG oder vorgespannten Gläsern wird in dieser Abhandlung jedoch bewußt nicht weiterverfolgt, um zunächst die grundlegenden Vor- und Nachteile von Glas als Werkstoffkomponente im Sandwichverbund besser analysieren zu können. Die Traglastversuche sollen zeigen, wie sich das charakteristische Bruchverhalten von gewöhnlichem Floatglas auf das Tragverhalten des Sandwichverbundes auswirkt.

Die flächige, schubfeste Verklebung von Glasplatten mit geeigneten Klebstoffen ist gängige Praxis, zum Beispiel in der Herstellung von Verbund- oder Verbundsicherheitsglas (VSG). So werden Glasscheiben mit glasklaren Harzen zu Verbundgläsern oder mit transparenten Butylfolien zu Verbundsicherheitsgläsern verarbeitet. Für den sichtbaren und dauerhaften Verbund von Glas mit Polycarbonat gelten im Grunde die gleichen Anforderungen.

- Gestalterische Aspekte

Die Oberflächenstruktur des in Bild 4.61 gezeigten Prototyps zeigt ein hochtransparentes Erscheinungsbild. Die Konturen des Polycarbonat-Wabenkerns kommen sehr klar zur Geltung, Spiegeleffekte werden durch das Glas verstärkt. Zudem wirkt das Strukturmuster des Wabenkerns bei gleichmäßiger Durchleuchtung gegenüber GFK- und PC-Deckschichten sehr viel kontrastreicher (Bild 4.61 / 4.62). Der aufgezeigte ästhetische Mehrwert setzt den Einsatz hochtransparenter und dauerhafter Klebesysteme voraus. Durch den Einsatz farbigen Polycarbonats in der Kernschicht werden Glaselemente in unterschiedlicher Farbgebung möglich.

- Funktionale Aspekte

Glas ist hochtransparent und verfügt über eine sehr gute Witterungsbeständigkeit. Es absorbiert UV-Strahlung und ist vollständig wasser- und gasdicht. Die genannten Aspekte macht die Verwendung von Glasdeckschichten gerade für Anwendungen im Außenbereich interessant. Der witterungsanfällige Polycarbonat-Wabenkern sowie die Klebefuge werden geschützt und vor äußeren Einwirkungen abgeschirmt. Eine effektive Abschirmung des Kernraums setzt zudem den gleichwertigen Verschluss der offenen Stirnseiten analog zu den Ausführungen in Kapitel 2.2.3.2, S.53 voraus.

Ähnlich wie bei GFK ist aufgrund der geringen Schichtdicke kein verbesserter Wärmedämmeffekt zu erwarten,

zumal Glas gemäß Bild 4.53 eine wesentlich höhere Wärmeleitzahl gegenüber PC aufweist. Die Dampfsperrwirkung wird sich durch Verwendung von Glasdeckschichten jedoch deutlich verbessern, da Glas gegenüber Polycarbonat vollständig gasdicht ist. Das Glas-PC-Sandwichgefüge lässt sich wärmeschutztechnisch gut mit einer Isolierverglasung vergleichen, bei der der Scheibenzwischenraum mit dem 3D-Wabenkern ausgefüllt ist und die abgeschlossenen Waben eine stehende Luftschicht ausbilden, die letztendlich den Dämmeffekt bewirken. Die geklebte Schichtfuge sollte daher vollständig dicht sein, um die hermetische Abgeschlossenheit der Waben zu garantieren und ein Eindringen von Feuchtigkeit über die Schichtfugen zu vermeiden.

Bezüglich der Feuerbeständigkeit ist gegenüber polymeren Deckschichten grundsätzlich eine Verbesserung zu erwarten, da Glas nach DIN 4102-1 als „nicht brennbar“ (A1) klassifiziert ist und es im Brandfall nicht zu einer direkten Beflammung des PC-Wabenkerns kommen kann. Fraglich ist aber der Einfluß der Glasdeckschichten auf die Feuerwiderstandsdauer, da die Schichtdicken vergleichsweise gering sind und das Polycarbonat als Thermoplast bereits ab ca. 100° C seine statischen Eigenschaften einbüßt. Auch das Verhalten des Klebesystems im Brandfall gilt als Einflußfaktor. Dieser komplexe Zusammenhang wäre Gegenstand einer eigenen Untersuchung und bleibt daher für die weitere Betrachtung unberücksichtigt.

Die reine Schlagfestigkeit von Floatglas ist, wie Bild 4.53 zeigt sehr eingeschränkt, Polycarbonat verfügt hingegen über eine sehr hohe Schlagfestigkeit. In der Glasbau-Praxis kommen daher für temporär stoßbeanspruchte Anwendungen Verbundsicherheitsgläser zum Einsatz. Gerade im Verbund bleibt das Gesamtgefüge bei Glasbruch weiter bestehen und verfügt über eine nutzbare Resttragfähigkeit. In den Traglastversuchen gilt es daher zu klären, wie sich das Glas-PC-Sandwichgefüge im Versagensfall verhält und ob es Parallelen im Trag- und Bruchverhalten zu konventionellen Verbundgläsern gibt.

Die Entsorgung und Rezyklierbarkeit von Sandwichelementen aus unterschiedlichen Werkstoffen wie Glas und Polycarbonat setzt wie bei der zuvor beschriebenen Variante mit GFK-Deckschichten die stoffliche Trennung (Delamination) der einzelnen Verbundkomponenten voraus. Ein mechanisches Abschälen der Deckschicht stellt sich nach Selbstversuch als äußerst ungünstig heraus, da die Glasdeckschicht den hohen Biegespannungen nicht standhält und bereits kurz nach Beginn des Auseinanderziehens krümelartig absplittert. Auch ein nachträgliches Abschaben der Glassplitter erweist sich nach mehreren Versuchen als schwierig und aufwendig. Eine saubere stoffliche Trennung lässt sich folglich nur durch Auswahl eines Klebemittels erreichen, das sich in seiner Klebwirkung durch eine gezielte äußere Einwirkung „deaktivieren“ lässt. Nach Rücksprache mit Herstellern der Kunststoff- und Klebeindustrie² existierten bereits solche Klebemittel, wie zum Beispiel Schmelzklebstoffe, die sich durch kurzzeitige, hohe thermische Einwirkung zersetzen und ihre Klebeigenschaft verlieren. Die Notwendigkeit des zusätzlichen Energieaufwandes zur Delamination ist jedoch kritisch zu bewerten. Gelingt es jedoch, die Komponenten stofflich voneinander zu trennen, können der Polycarbonat-Kern sowie die abgelösten Glasdeckschichten vollständig den jeweiligen Wertstoffkreisläufen zugeführt werden. Bei der im Folgenden beschriebenen Auswahl geeigneter Klebstoffe bleibt die genannte Thematik „Deaktivierbarkeit der Klebeigenschaft“ unberücksichtigt.

2 nach Angabe von Design Composite, Mittersill (Hersteller des Produktes „clear pep“), 28.01.2005

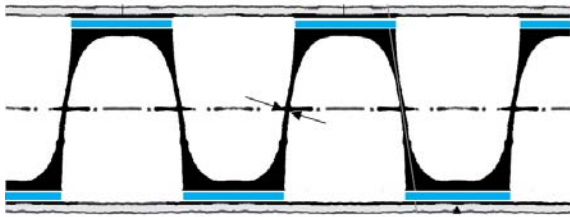


Bild 4.63: Anordnung des Klebstoffs im Sandwichgefüge (blau)

4.4.2.3 Auswahl geeigneter Klebstoffe

Die Kombination des 3D-Wabenkerns aus Polycarbonat mit Deckschichten aus GFK und Glas macht die sorgfältige Auswahl geeigneter Klebstoffe für die jeweilige Werkstoffkombination notwendig. Wie bereits in Kapitel 1.1.4.4 dargestellt, ist die Funktionsfähigkeit einer Sandwichstruktur erst durch das Vorhandensein einer kraftschlüssigen Schichtfuge sichergestellt (Bild 4.63). Folgende grundlegende Eigenschaften bestimmen die Auswahl der geeigneten Klebstoffe:

- Optimale Haftungseigenschaften auf Polycarbonat und dem jeweiligen Deckschichtmaterial
- Ausreichende Festigkeit und Steifigkeit zur Sicherstellung des kraftschlüssigen Verbundes längs und quer zur Platte
- Dauerhafte, farblose Transparenz im ausgehärteten Zustand zur Sicherstellung der gestalterischen Qualität
- Witterungsbeständigkeit gegenüber Feuchtigkeit, Strahlung (vor allem UV-Strahlung) und Temperaturwechsel
- Elastizität und Unempfindlichkeit gegenüber temporären Einwirkungen wie Stößen oder Schwingungen
- Kaltaushärtende Systeme zur Vermeidung von Zwängungsspannungen aufgrund des unterschiedlichen Wärmeausdehnungsverhaltens der Fügepartner Polycarbonat und Glas/GFK
- Die Wärmedehnzahl des Klebstoffs sollte einen ähnlichen Wert wie die Werkstoffe einnehmen, um die Zwängungsspannungen durch Temperaturdehnung zu minimieren

Durch fachliche Unterstützung der Arbeitsgruppe „Werkstoff- und Oberflächentechnik“, Prof. Dr. Geis an der Technischen Universität Kaiserslautern wurden unter Berücksichtigung der genannten Aspekte folgende Klebesysteme für die Deckschichtvarianten ausgewählt:

- Zweikomponenten-Klebesystem auf Polyurethanbasis zur Verklebung des Polycarbonat-Wabenkerns mit GFK-Deckschichten
- UV-Klebesystem auf Acrylatbasis zur Verklebung des Polycarbonat-Wabenkerns mit Floatglas-Deckschichten

Zur Untersuchung der favorisierten Klebstoffe hinsichtlich ihrer statischen Eignung werden im Labor Zugscheversuche unter Verwendung von Polycarbonat, Floatglas und GFK gemäß Bild 4.64 durchgeführt.

Als UV-Klebesystem wurden die drei Produkte „WT Photowell 1001, 1011 und DA 1015“ getestet. Die genannten Klebesysteme eignen sich nach Angaben des Herstellers³ für die Verklebung von transparenten Werkstoffen wie Glas und Polycarbonat und härten durch kurzzeitige UV-Bestrahlung aus. Im ausgehärteten Zustand stellt sich eine farblose, glasklare Klebnaht ein. Nach Herstellerangaben unterscheiden Sie sich hinsichtlich ihrer Sprödigkeit. Der Klebstoff „WT DA 1015“ wird als „flexibel“ und besonders stoßunempfindlich bezeichnet und weist in den Produktspezifikation eine höhere Reißdehnung gegenüber den beiden anderen Produkten auf, was bei unterschiedlichen Fügematerialien vorteilhaft sein kann.

Als Zweikomponenten-Klebesystem wurde das Produkt „Araldite 2026“ der Firma Huntsman ausgewählt. Nach Herstellerangaben⁴ bildet der Klebstoff eine transparente Schicht und eignet sich besonders gut zur Verklebung von Kunststoffen untereinander und Glas. Der Klebstoff härtet bei Raumtemperatur durch chemische Reaktion der Harzbestandteile aus und ist stoß- und schlagresistent.

Im Vorfeld wird auf Grundlage der Prüfergebnisse aus dem Biegeversuch B07, S.90ff. die maximale Schubspannung in der Klebefuge ermittelt, um abschätzen zu können, in welcher Größenordnung die Festigkeiten der Klebstoffe liegen sollten. Auf Grundlage von [kra96] S.152 gilt für die Schubspannung τ in der Klebefuge gemäß Bild 4.65:

$$(24) \quad \tau_{\text{Klebefuge}} = \frac{Q_{\max} \cdot t_d \cdot d}{2 \cdot I_y} \quad \text{wobei } Q_{\max} = P_{\max} / 2$$

Es ergibt sich in der Annahme folgender Werte aus B07:

$$Q_{\max} \sim 3/2 = 1,5 \text{ kN} \quad (P_{\max} \sim 3 \text{ kN, aus Diagramm B07})$$

$$d = 38 \text{ mm}; t_d = 2 \text{ mm}; I_y = 24,28 \text{ cm}^4 \quad (\text{gemäß B07})$$

$$\text{Ergebnis Schubspannung } \tau_{\text{Klebefuge}} = 0,23 \text{ N/mm}^2$$

Für die Verklebung stehen jedoch nur 35% effektive Kontaktfläche des 3D-Wabenkerns zur Verfügung, die effektive Schubspannung erhöht sich damit auf $0,7 \text{ N/mm}^2$.

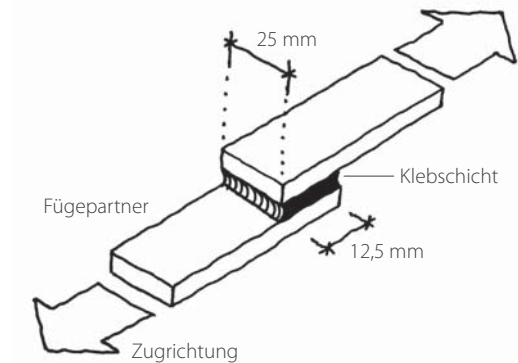


Bild 4.64: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Klebstoffeignung in Anlehnung an DIN EN 1465

Für die Schubspannung $\tau(z)$ gilt für jede beliebigen Stelle z im Querschnitt:

$$\tau(z) = \frac{Q \cdot S(z)}{b \cdot I_y} \quad \text{wobei } Q \text{ die Querkraft, } b \text{ die Breite des Querschnitts und } I_y \text{ das Trägheitsmoment des Querschnitts ist.}$$

Unter Berücksichtigung des statischen Momentes S in der Klebefuge

$$S_{\text{Klebefuge}} = \frac{d}{2} \cdot A_d = \frac{t_d \cdot b \cdot d}{2} \quad \text{ergibt sich für die maßgebliche Schubspannung des Klebstoffs Gleichung (24)}$$

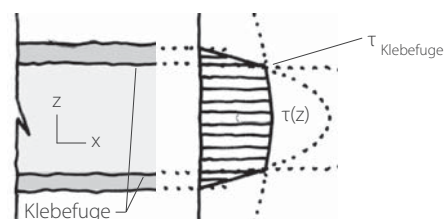


Bild 4.65: Schubspannungsverteilung $\tau(z)$ im Sandwichgefüge nach [kle05] und Herleitung der maßgeblichen Schubspannung in der Klebefuge

3,3 [wel06], [hun04] Datenblätter zu den verwendeten Klebstoffen im Anhang A5 - A9

Da das Trägheitsmoment I_y des Sandwichs werkstoffunabhängig ist, gilt diese Prognose auch für andere Deckschichtmaterialien gleicher Schichtdicken.

Die Zugscherversuche wurden bei Raumtemperatur gemäß DIN EN 1465 im Labor der AWOK durchgeführt. (Bild 4.64). Die Übersicht in Bild 4.66 zeigt die gemittelten Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen. Dabei wurden alle Klebstoffe auf ihre Haftungseigenschaften mit den drei Werkstoffen Polycarbonat, GFK und Floatglas getestet. Für die Verklebung von Glas und Polycarbonat mittels UV-Klebstoff wurde der Einfluß der Alterung, bei Polycarbonat zusätzlich der Einfluß einer „Corona“-Behandlung⁵ untersucht. Die Versuche zeigen gegenüber der ersten Schätzung aus Gl. (24) grundsätzlich weit höhere Bruchspannungen.

Das UV-Klebessystem „WT DA 1015“ verfügt über die beste Haftung mit Polycarbonat (bricht kohäsiv⁶), dessen Bruchspannung mit 4,8 N/mm² im gleichen Bereich liegt wie der Wert von Glas (5,0 N/mm²). Bruchspannungen von ca. 5,6 N/mm² weisen jeweils die Haftversuche von GFK und Polycarbonat bei Verwendung des PU-Klebstoffs auf, dessen Werte auch den Angaben des Herstellers⁷ entsprechen. Für die Prüfkörperherstellung zur Untersuchung des Tragverhaltens wurden auf Grundlage der Ergebnisse folgende Klebstoffauswahl festgelegt:

- GFK-Deckschichten: Zweikomponenten-PU-Klebesystem „Huntsman Araldite 2026“
- Glas-Deckschichten: UV-Klebesystem „WellmannTech WT DA 1015“

- 5 Bei der Corona-Entladung handelt es sich um ein physikalisches Oberflächenbehandlungsverfahren für Kunststoffe, bei dem eine Erhöhung der Oberflächenenergie mittels einer Elektrode hergestellt wird. Diese Erhöhung kann sich bei Polycarbonat positiv auf das Haftungsverhalten auswirken.
- 6 Nach [hab02] verläuft ein kohäsiver Bruch durch Bruch im Material der Klebeschicht, ein adhäsiver Bruch durch Ablösen des Klebschichtmaterials vom Fügepartner
- 7 [hun04] Statische Kennwerte nach Produktdatenblatt, Anhang Seite A6 - A9

Material Fügepartner	UV-Klebesystem auf Acrylatbasis WT 1001	UV-Klebesystem auf Acrylatbasis WT 1011	UV-Klebesystem auf Acrylatbasis WT DA 1015	Zweikomponenten-Harzsystem auf Polyurethanbasis Araldite 2026
Polycarbonat	$\tau = 3,9 \text{ N/mm}^2$ Kohäsionsbruch	$\tau = 3,6 \text{ N/mm}^2$ Kohäsionsbruch	$\tau = 4,8 \text{ N/mm}^2$ Kohäsionsbruch	$\tau = 5,7 \text{ N/mm}^2$ Kohäsionsbruch
Polycarbonat Corona-behandelt*		$\tau = 3,2 \text{ N/mm}^2$ Kohäsionsbruch		
Polycarbonat gealtert**		$\tau = 1,75 \text{ N/mm}^2$ Adhäsionsbruch		
Polycarbonat Corona-behandelt, gealtert		$\tau = 3,2 \text{ N/mm}^2$ Adhäsionsbruch		
Floatglas	$= 6,0 \text{ N/mm}^2$ Versagen Prüfkörper	$\tau = 7,9 \text{ N/mm}^2$ Bruch Fügepartner	$= 5,0 \text{ N/mm}^2$ Versagen Prüfkörper	$= 8,0 \text{ N/mm}^2$ Bruch Fügepartner
Floatglas gealtert		$\tau = 4,2 \text{ N/mm}^2$ Bruch Fügepartner		
GFK 30% Polyester matrix	$\tau = 3,5 \text{ N/mm}^2$ Bruch Fügepartner			$\tau = 5,5 \text{ N/mm}^2$ Bruch Fügepartner

Bild 4.66:

Ergebnisse der bei AWOK, TU Kaiserslautern durchgeführten Zugscherversuche zur Klebstoffauswahl in Anlehnung an DIN EN 1465

Vorherige Entfettung aller Fügepartner durch Isopropanol (PC), Aceton (Glas), Naßschleifen (GFK),

* Indirekte Corona-Behandlung, ** Künstliche Alterung durch Lagerung für 14 Tage im Wasserbad bei 40°C

Scherzugfestigkeit $\tau = F/A$, Überlappungsfläche $A = 25 \times 12,5 \text{ mm}^2$ (gemäß Bild 83), Werte gemäß Anhang A73 - A86

Die UV-Klebesysteme WT 1001, WT 1011 und WT DA 1015 sind Produkte der Wellmann technologies GmbH, Friedelsheim
Das 2K-Klebesystem Araldite 2026 ist ein Produkt der Huntsman Advanced Materials (Switzerland)

4.4.2.4 Herstellung von Prüfkörpern

Die für die Traglastversuche gewählten Deckschichtdicken von 2 mm orientieren sich an der Referenzplatte mit Polycarbonat-Deckschichten, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Die Stärken der GFK-Deckschichten besitzen eine fertigungsbedingte Streuung zwischen 1,5 und 2 mm. Zur Ermittlung statischer Kennwerte wird der ungünstige Fall mit einer Schichtdicke von 1,5 mm angesetzt.

Die Herstellung erfolgt händisch nach folgendem Produktionsablauf⁸:

Vorbereitung des 3D-Wabenkerns aus Polycarbonat:

- Aufräumen der Kontaktflächen (Bild 4.67)
- Entfetten der Kontaktflächen mit Isopropanol

Vorbereitung und Verklebung GFK-Deckschichten:

- Nassschleifen der Oberflächen mit Scheuermittel
- Entfetten der zu verklebenden Flächen mit Isopropanol
- Auftragen des PU-Klebstoffs „Araldite 2026“ auf die Kontaktflächen der Kernschicht
- Verbund der Schichten
- Aushärten unter leichtem Anpressdruck, ca. 8 Stunden

Vorbereitung und Verklebung Floatglas-Deckschichten:

- Entfetten der zu verklebenden Flächen mit Aceton
- Auftrag des UV-Klebstoffs „WT DA 1015“ auf die Kontaktflächen der Kernschicht
- Verbund der Schichten
- Aushärtung bei ca. 1 Minute durch Beleuchtung der Klebeflächen mit UV-Handlampe (250 W) (Bild 4.68)

Die fertiggestellten Prüfkörper sind in Bild 4.69 gezeigt, dessen Schichtaufbauten in Bild 4.70 gegenübergestellt.

Für die Biegeversuche werden als zusätzliche Deckschichtvariante drei weitere Prüfkörper hergestellt, bei denen die 3D-Wabenplatte aus B07 vollflächig mit Glasdeckschichten laminiert wird (Schichtaufbau Bild 4.71). Für den Verbund stehen hier nun 100% Kontaktfläche zur Verfügung, die bereits vorhandene PC-Deckschicht dient

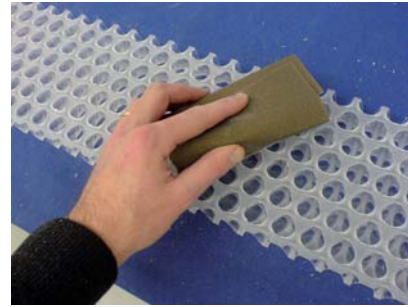


Bild 4.67: Aufräumen der Kontaktflächen der PC-Kernschicht mit feinem Schleifpapier zur Verbesserung der Haftfähigkeit



Bild 4.68: Aushärtung des UV-Klebstoffs mittels UV-Handlampe bei der Herstellung von Glassandwichen

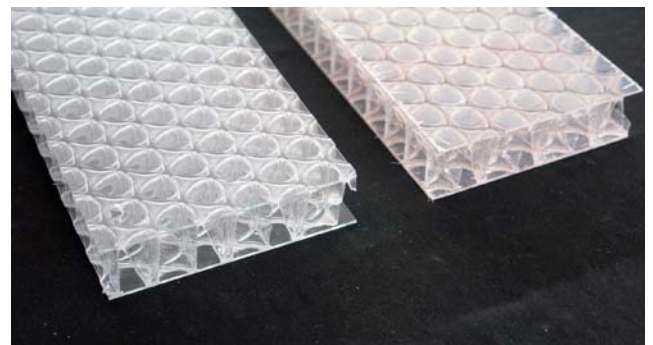


Bild 4.69: Fertigproduzierte Sandwichen: Floatglasdeckschichten (links), GFK-Deckschichten (rechts)

3D-Wabenplatte GFK, 39 mm	3D-Wabenplatte Glas, 40 mm
1,5 mm GFK „Scobaglas“ 30% Glasfaser in UP-Matrix	2 mm Floatglas
2-Komponenten-Klebesystem auf Polyurethanmatrix	UV-Klebesystem „Photowell DA 1015“
36 mm Polycarbonat-Wabenkern	36 mm Polycarbonat-Wabenkern
2-Komponenten-Klebesystem auf Polyurethanmatrix	UV-Klebesystem „Photowell DA 1015“
1,5 mm GFK „Scobaglas“ 30% Glasfaser in UP-Matrix	2 mm Floatglas

Bild 4.70: Schichtfolge der hergestellten GFK- und Glassandwichverbünde

⁸ Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte nach Empfehlungen und Anleitung der AWOK Prof.Dr. Geis, TU Kaiserslautern und in Anlehnung an die Ausführungen von [hab02] S.583ff.

3D-Wabenplatte Glas+Polycarbonat, 44 mm	
2 mm Floatglas	
UV-Klebesystem „Photowell DA 1015“	
2 mm Polycarbonat	} = 3D-Wabenplatte
36 mm Polycarbonat-Wabenkern	
2 mm Polycarbonat	
UV-Klebesystem „Photowell DA 1015“	
2 mm Floatglas	



Bild 4.71: Schichtfolge des hergestellten Glas+Polycarbonat-Sandwich



Bild 4.72: Versuchsreihe Biegung mit GFK-Deckschichten: Ausbildung von Zugdiagonalen in den Wandungsflächen der Kernschicht



Bild 4.73: Bruchbild der Prüfkörper 1 und 2: die GFK-Deckschicht ist mittig in der Zugzone gerissen.



Bild 4.74: Bruchbild des Prüfkörpers 3: Aufreißen der Klebefuge im schubbeanspruchten Auflagerbereich.

als Haftgrund. Für die Verklebung wird ebenfalls der UV-Klebstoff „WT DA 1015“ verwendet.

Die weitgehende Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse bestätigt die gute Qualität der nach den oben genannten Verfahren hergestellten Klebefugen. In den folgenden Traglastversuchen wird der Einfluß des Schubmoduls der Klebefuge vernachlässigt.

4.4.3 Untersuchungen zum Tragverhalten - Biegung

Zur Beurteilung des Tragverhaltens der neuen Sandwichverbünde wurden zunächst Biegeversuche durchgeführt. Versuchsanordnung und -durchführung entsprechen vollständig den Ausführungen in Kapitel 3.2. Die Prüfkörper der Abmessungen 800x150 mm spannen jeweils über 750 mm., der 3D-Wabenkern ist gemäß Kap. 4.2.1.3 in seine Hauptrichtung orientiert. Die Untersuchung erfolgt für 3D-Wabenplatten mit GFK, Floatglas- und kombinierten Floatglas-Polycarbonatdeckschichten.

4.4.3.1 Deckschichten aus GFK (1,5-2 mm)

Die Einzelversuche führen wie in Bild 4.76 ersichtlich zu reproduzierbaren Ergebnissen. Die Kraft-Wege-Linie zeigt ein linear-elastisches Verformungsverhalten, bei fortgeschrittener Verformung stellen sich die im Kern bereits wiederholt beobachteten Zugdiagonalen in den Wandungsflächen ein (Bild 4.72). Die für die Zielverformung notwendige Last ist im Vergleich zu den Versuchsergebnissen der Referenzplatte mit PC-Deckschichten aus B07 etwa doppelt so groß, folglich verfügt die mit GFK-Deckschichten ausgestattete 3D-Wabenplatte über eine fast doppelt so hohe Gesamtsteifigkeit.

Im Gegensatz zu B07 wird die Endverformung von 50 mm jedoch nicht erreicht. Die ersten beiden Prüfkörper versagen bei 4,9 bzw. 5 kN durch plötzlichen Bruch der Deckschicht in der Zugzone (Bild 4.73), genau mittig im Bereich des höchsten Biegemoments. Sowohl Harzmatrix als auch Fasern brechen vollständig über die gesamte Breite. In der Folge reißt die unterseitige Klebefuge zu den Seiten hin auf. Nach Bild 4.75 ergibt sich für die Bruchspannung des zugbeanspruchten Untergurts ein Wert von $\sigma = 7,4 \text{ kN/cm}^2$, der unter dem für das GFK in Bild 4.73 angegebenen Herstellerwert von $\sim 10 \text{ kN/cm}^2$ bleibt.

Der dritte Prüfkörper versagt bereits bei 3,3 kN durch

Aufreißen der Klebefuge im Bereich der Druckzone (Bild 4.74). Die Schubfuge reißt vom Auflager her auf, wo die Schubspannungen am größten sind. Die visuelle Begutachtung der Schichtfuge ergibt, dass die Klebenaht überwiegend adhäsiv gebrochen ist. Dies weist eher auf lokale Schwachstellen in der Klebefläche, denn auf Überschreitung der Klebefestigkeit hin, die ihre Ursache vermutlich in der Herstellung der Prüfkörper durch unzureichende Benetzung der Fügepartner oder eine wellige Oberfläche hat.

Vor dem Hintergrund größerer Lastniveaus gegenüber der Referenzplatte in B07 zeigt der 3D-Wabenkern wiederholte gute Stabilitätseigenschaften. Nach Wegnahme der Last relaxiert der Kern vollständig zurück, es sind keine Eindrücke oder lokale Verformungen festzustellen. Der Anteil der Schubverformung an der Gesamtverformung ist mit ca. 22% aufgrund der dehnsteiferen GFK-Deckschichten wesentlich höher, der aus den Meßdaten ermittelte Schubmodul⁹ bestätigt jedoch den Wert der Referenzplatte aus B07.

4.4.3.2 Deckschichten aus Floatglas (2 mm)

Der Versuch zeigt eine starke Reduzierung der absoluten Verformungen gegenüber 3D-Wabenplatten mit PC- und GFK-Deckschichten. Alle drei Prüfkörper weisen zudem über den gesamten Versuchsverlauf ein nahezu linear-elastisches Verformungsverhalten auf (Bild 4.81). Die Gesamtsteifigkeit nimmt etwa den 7fachen Wert der Referenzplatte mit Polycarbonatdeckschichten ein (Bild 4.86).

Die maximalen Verformungen der Prüfkörper liegen zwischen 7,5 und 11 mm, die Bruchkräfte streuen zwischen 2,4 und 3,9 kN. Alle drei Prüfkörper weisen das gleiche Bruchbild auf, die Glasdeckschicht versagt durch Reißbildung in der Zugzone. Im Lasteinleitungsbereich bilden sich auf der Unterseite strahlenförmige Risse aus, die sich von der einen Kante fächerartig in Form eines gleichseitigen Dreiecks zur anderen Kante ausbreiten (Bild 4.78 / 4.79). Die Abstände der Risse entsprechen in etwa der Schichtdicke von 2 mm. Auf der Oberseite bilden sich aufgrund der Lastumlagerung feine Risse in Feldmitte aus. Die punktuelle Reißausbreitung ist vermutlich auf Spannungspitzen zurückzuführen, die sich durch das leichte Verkanten der Lasteinleitungsrolle ergeben. Die Ausgangspunkte der Reißausbreitung variieren von Prüfkörper zu Prüfkörper

$$\sigma_{D,z} = \frac{M}{t_0 \cdot d \cdot b} = \frac{P \cdot l}{6 \cdot t_0 \cdot d \cdot b} = \frac{5 \text{ kN} \cdot 75 \text{ cm}}{6 \cdot 0,15 \cdot 3,75 \cdot 15 \text{ cm}^3} = 7,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Bild 4.75: Rechnerische Ermittlung der Bruchspannung im zubeanspruchten GFK-Untergurt nach Gl. (1), Seite 72 und Bild 19, Seite 81

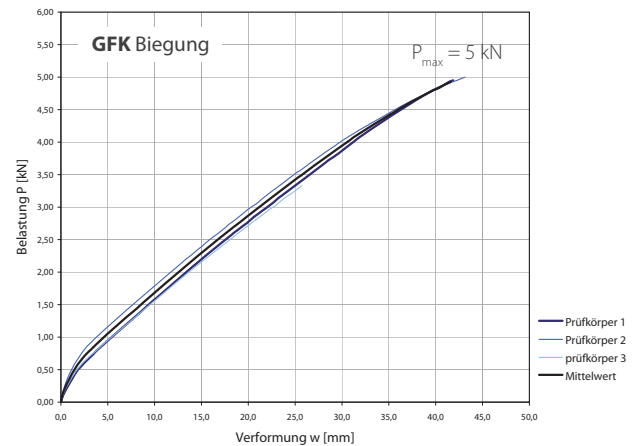


Bild 4.76: Versuchsreihe Biegung mit GFK-Deckschichten - Lastverformungsdiagramm (Versuchsprotokoll im Anhang A61f.)

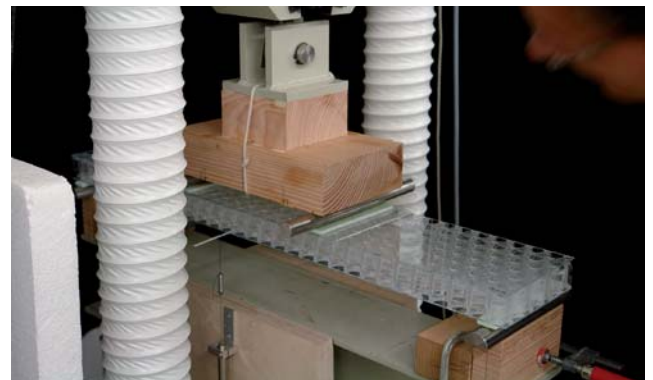


Bild 4.77: Versuchsreihe Biegung mit Floatglas-Deckschichten



Bild 4.78: Bruchbild in der Zugzone: strahlen- bzw. parallelförmige Reißausbreitung im Lasteinleitungsbereich

⁹ siehe Versuchsprotokoll im Anhang, Seite xx

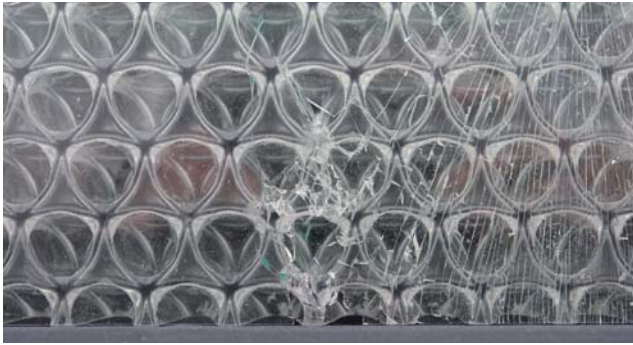


Bild 4.79: Rißbild der zugbeanspruchten Glasdeckdicht

$$\sigma_{D,z} = \frac{M}{t_o \cdot d \cdot b} = \frac{P \cdot l}{6 \cdot t_o \cdot d \cdot b} = \frac{3,9 \text{ kN} \cdot 75 \text{ cm}}{6 \cdot 0,2 \cdot 3,8 \cdot 15 \text{ cm}^3} = 4,3 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Bild 4.80: Rechnerische Ermittlung der Bruchspannung im zubeanspruchten Glas-Untergurt nach Gl. (1), Seite 72 und Bild 19, Seite 81

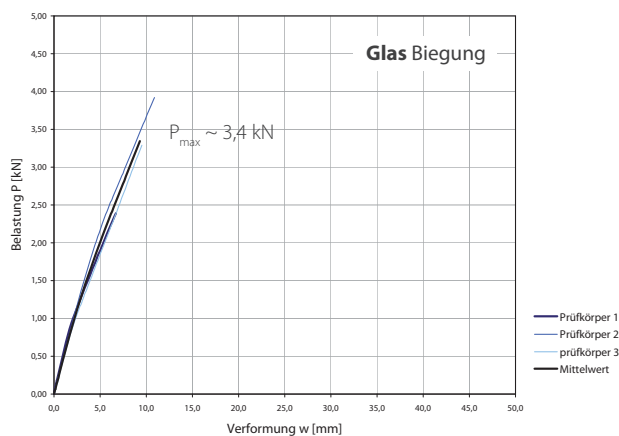


Bild 4.81: Versuchsreihe Biegung mit Floatglas-Deckschichten - Lastverformungsdiagramm (Versuchsprotokoll im Anhang A64f.)

bezüglich Seite und Lasteinleitungspunkt. Nach Bild 4.80 ergibt sich für die Bruchspannung des zugbeanspruchten Untergurts von Prüfkörper 2 ($P_{\max} \sim 3,9 \text{ kN}$) ein Wert von $\sigma_{D,z} = 4,3 \text{ kN/cm}^2$, der nahe an die charakteristische Biegezugfestigkeit von Floatglas mit $4,5 \text{ kN/cm}^2$ herankommt. Dies entspricht einer Materialausnutzung von 96%.

Bemerkenswert erscheint das Verhalten der Glasscheiben bzw. des Gesamtgefüges im Versagensfall: trotz Rißbildung widersteht die Sandwichstruktur weiterhin dem Belastungsniveau, das bei allen drei Versuchen für weitere 60 Sekunden gehalten werden kann. Die Glasscheiben bleiben durch die flächige Verklebung in ihrer Lage fixiert, es lösen sich keine Splitter oder Scherben ab. Erst bei Rücknahme der Kraft relaxiert die Polycarbonat-Kernschicht zurück, was das Abbrechen kleiner Glaskrümel im Kantenbereich bzw. vereinzelt über Wabenöffnungen zur Folge hat. Teilweise hängen im Randbereich auch kleine Krümelverbünde von der Kernschichtunterseite herunter. Die Glaskrümel weisen Maximaldurchmesser von ca. 2 mm auf. Größere Scherben oder Splitter lösen sich nicht ab und sind im Bruchbild auch nicht feststellbar.

Die geklebte Schichtfuge scheint nach visueller Begutachtung unbeschädigt. In lokalen Bereichen, wo sich Glaskrümel abgelöst haben, weisen die Fügepartner jeweils Klebereste auf, die auf einen kohäsiven Bruch der Klebschicht hinweisen und die gute Haftungseigenschaften des Klebstoffs sowohl mit Polycarbonat als auch Glas bestätigen.

Die Kernschicht zeigt auch in Kombination mit Deckschichten aus Glas ein günstiges Verformungsverhalten ohne lokale Instabilitätsformen. Die Stabilität des Gesamtgefüges ist während des gesamten Versuchsverlaufs gegeben. Aufgrund der um den Faktor 30 erhöhten Dehnsteifigkeit der Glas-Deckschichten trägt die Kernschicht mit einem Schubverformungsanteil von ca. 77% maßgeblich zur Gesamtverformung des Sandwichstruktur bei, wie der Wertevergleich auf Seite 143 zeigt. Der aus den Meßdaten ermittelte Schubmodul gleicht in etwa den Werten aus B07 bzw. den GFK-Deckschichten, was auch ein Hinweis darauf ist, dass der Einfluss der Klebefuge auf die Schubverformung sehr gering ist.

4.4.3.3 Deckschichten als Glas+PC-Verbund (4 mm)

In einer weiteren Variante wird die 40 mm starke 3D-Wabenplatte aus B07 mit 2 mm starken Glasplatten beidseitig laminiert. Die Gesamtstärke erhöht sich entsprechend

auf 44 mm. Der fünflagige Schichtaufbau führt im linear-elastischen Bereich zu einer Erhöhung der Gesamtsteifigkeit um 1600% (bei Gewichtsverdopplung) und gegenüber der Variante nur mit Glas-Deckschichten um 230%. Zwei der drei Prüfkörper versagen wie in Bild 4.43 gezeigt bei gerade einmal 6 mm Gesamtverformung (ca. 1/125) und 4,3 kN Bruchlast.

Analog zu der vorherigen Versuchsreihe versagt die Zugzone durch Reißbildung in der unterseitigen Glas-Deckschicht im Bereich der Lasteinleitungspunkte (Bild 4.83). Der Vergleich der Bilder 4.88 und 4.93 zeigt sehr deutlich, dass die Reißgeometrien nahezu identisch sind. Im Gegensatz zu der Variante nur mit Glas-Deckschichten fallen aber auch nach Wegnahme der Last keine Glaskrümel oder -splitter ab. Die gerissenen Glas-Deckschichten verbleiben wie bei einer Verbundglasscheibe im Gefüge, die Haftung zur Polycarbonatschicht bleibt vollständig aufrechterhalten.

Prüfkörper 3 weist im Gegensatz zu den beiden anderen Prüfkörpern ein stufenförmiges Versagen auf. Ein erstmaliger Lastabfall erfolgt bereits bei 2,6 kN (Bild 4.85) durch Reißbildung in der Zugzone. Die Last fällt in der Folge auf ca. 2 kN zurück (a). Die Sandwichstruktur kann der Belastung aber weiter standhalten. Bei fortschreitender Verformung kann die Last innerhalb von 2 Minuten noch einmal auf fast 3 kN gesteigert werden (b). Der Ausfall der unteren Glas-Deckschicht führt in dieser Phase zur Aktivierung der unteren Polycarbonatschicht als alleinige Zugzone. Die aus dem Biegemoment resultierenden Druckspannungen werden weiterhin durch die intakte Glas-Deckschicht auf der Oberseite aufgenommen. Aufgrund der geringeren Materialsteifigkeit der Zugzone stellt sich in der Folge aber eine größere Biegeverformung in den Deckschichten ein (Kraft-Wege-Kurve in Bild 4.85 ist flacher), was zur Überschreitung der Biegezugspannungen in der oberseitigen Glas-Deckschicht führt. Die hier zu beobachtende Reißbildung bewirkt ein erneutes Abfallen der Kraft (c). Zur Zerstörung des Sandwichgefüges oder zum Ablösen von Glassplittern kommt es jedoch nicht, nach Rücknahme der Kraft ist das Gefüge weiterhin vollständig erhalten.



Bild 4.82: Kombination des 3D-Wabenkerns aus Polycarbonat mit unterschiedlichen Deckschichten (v.l.n.r.): Polycarbonat, GFK30%, Glas



Bild 4.83: Bruchbild Zugzone von unten

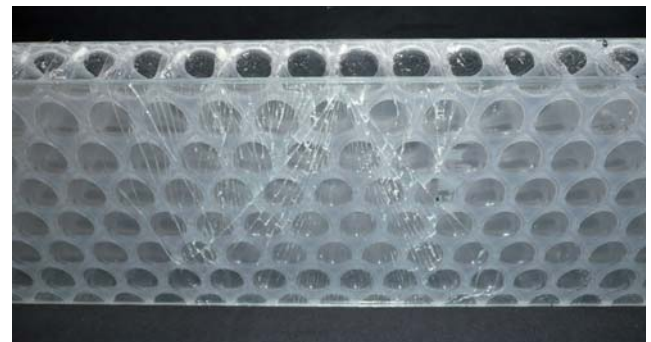


Bild 4.84: Bruchbild Zugzone von der Seite

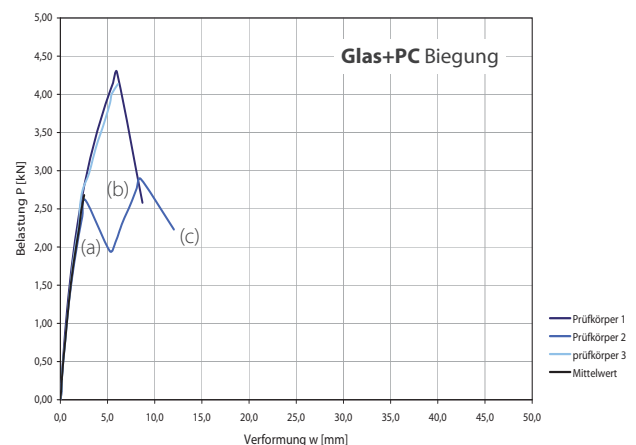


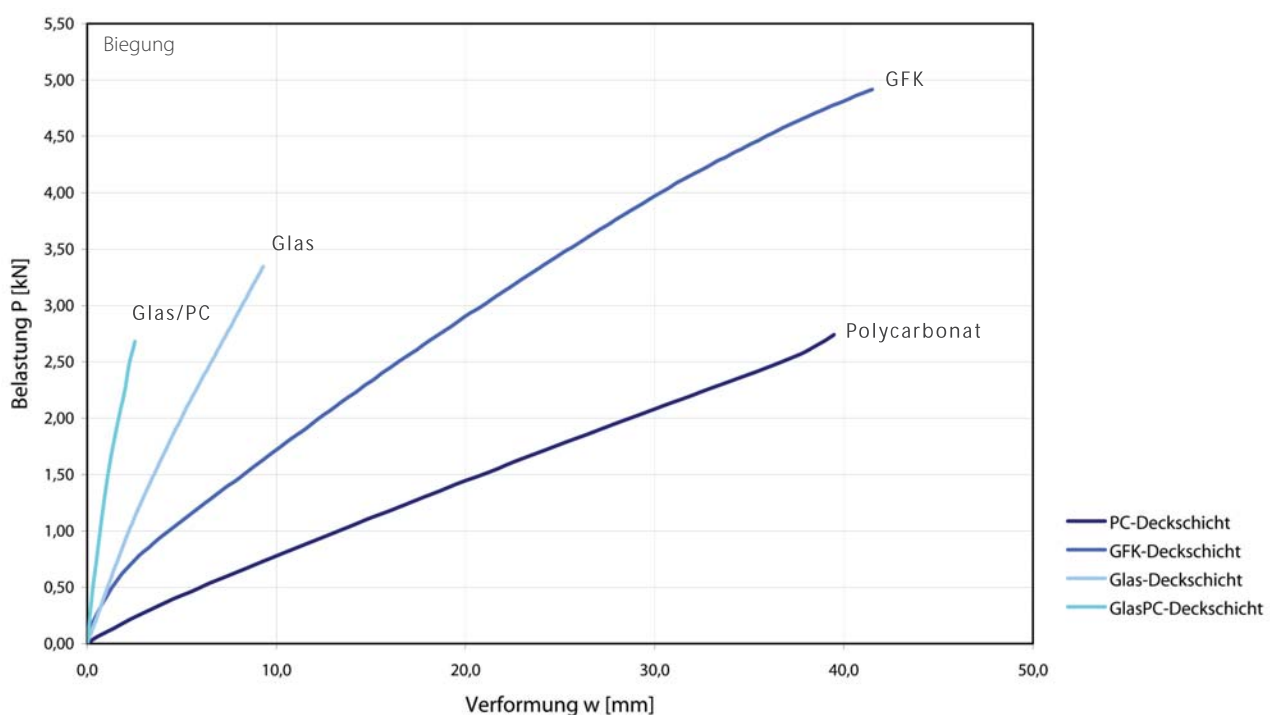
Bild 4.85: Versuchsreihe Biegung mit Glas/PC-Deckschichten - Lastverformungsdiagramm (Versuchsprotokoll im Anhang A66f.)

4.4.3.4 Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse

Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse	36 mm + 3D-Wabenkern PC +	2 x 1,5 mm GFK	2 x 2mm Floatglas	2 x (2+2) mm Floatglas+PC	2 x 2mm PC*	Zeile Protokoll (Anhang)
Gesamtstärke Sandwich [mm]		39	40	44	40	3
Gesamtsteifigkeit B [kNcm²] m=dP/dw, k=23/1296	B = m k l³	9304	34422	79822	4948	
Vergleichskennwerte Steifigkeit						
Steifigkeit pro Meter [Nm²/m]	B ₀ = B / b	6203	22948	53215	3299	4
Anteil Schubverformung ca. [%]	γ = 1 - B ₀ / E I _y	22%	77%	58%	11%	5a
Errechnete Sandwichsteifigkeit [Nm²/ m] nach Sandwichtheorie	B _b = E ₀ t ₀ d² / 2	7594	101080	126801	3321	6
Äquivalentes E-Modul E _{Äq} [kN/cm²]	E _{Äq} = B / I _y	125	430	750	62	7
Vergleich: Vollplatte [kN/cm²]	E (Werkstoff Deckschicht)	720	7000	---	230	7a
Leichtbaukennzahlen						
Durchschnittsgewicht Versuchskörper [g]	absolut	1010	1690	2255	1100	9
Vergleich: Vollplatte [g]		8160	11520	12672	5760	9a
Gewichtsverhältnis [%]		12%	15%	18%	19%	9b
Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	β = B / G	9,21	20,37	35,40	4,50	10
Vergleich: Vollplatte		6,71	48,61	58,82	3,19	10a

Bild 4.86: Statische Kennwerte aus Vierpunktbiegeversuch - Materialkombinationen im Vergleich (vgl. Anhang A61 - A67)

* Werte übernommen aus Versuchsreihe B07, vgl. Seite 88

Bild 4.87: Lastverformungsdiagramm aus Vierpunktbiegeversuch - Materialkombinationen im Vergleich
Werte für die PC-Deckschicht aus Versuchsreihe B07, vgl. Seite 88

4.4.4 Untersuchungen zum Tragverhalten - Druck

Analog zu den Versuchen in Kapitel 3 erfolgt die statisch-konstruktive Untersuchung der deckschichtmodifizierten 3D-Wabenplatten unter zentrischer Druckbeanspruchung. Versuchsanordnung und -durchführung entsprechen vollständig den Ausführungen in Kapitel 3.3. Die 150 mm breiten Prüfkörper haben eine Knicklänge von 400 mm, der 3D-Wabenkern ist mit seiner Hauptrichtung parallel zur Kraftrichtung orientiert. Die Untersuchung erfolgt für 3D-Wabenplatten mit GFK- und Floatglasdeckschichten.

4.4.4.1 Deckschichten aus GFK (1,5 mm)

Die zentrische Lasteinleitung geht mit einem linearen Zuwachs der für die jeweilige Zielverformung erforderlichen Kraft einher. Lokale Instabilitäten sind bis zum Eintreten des Versagens nicht festzustellen.

Prüfkörper 1 versagt bei 46,9 kN Bruchlast durch schlagartiges Ablösen der GFK-Deckschichten im Fußpunktbereich über etwa ein Viertel der Knicklänge (Bild 4.88). Die Klebefuge versagt überwiegend kohäsiv, die Fügepartner weisen jeweils flächige, homogen verteilte Klebereste auf. Durch das Aufreißen sind auf der Innenseite der GFK-Deckschichten teilweise Glasfasern freigelegt worden. Die Prüfkörper 2 und 3 versagen wesentlich früher bei ca. 30 kN bzw. 36 kN Bruchlast durch beidseitiges Ablösen der Deckschichten vom Kern (Bild 4.89). Die Ablösung erfolgt jedoch zentrisch in Plattenmitte durch gleichzeitige Wölbung der Deckschichten nach außen. In Kopf- und Fußpunkt sind die Schichtfugen weitgehend intakt.

Die beobachtete Versagensform deutet auf den Klebstoff als Schwachstelle hin. Dessen Haftfestigkeit reicht offensichtlich zur Stabilisierung in Querrichtung nicht aus. Die Streuung der Bruchlasten ist zudem ein Hinweis dafür, dass die Klebefugen in ihrer Qualität voneinander abweichen. Dieser Aspekt spielt jedoch eine untergeordnete Rolle, da die Versuchsreihe hinsichtlich der Funktionsweise des Gesamtgefüges aussagekräftig genug ist. Im Wertevergleich nach Bild 4.95 weist die Drucksteifigkeit einen um 50% höheren Wert gegenüber der Referenzplatte aus D07 auf. Aufgrund der sich von Beginn an einstellenden, wenn auch geringfügigen Auslenkung des Gesamtgefüges bleibt der Wert aber um ca. 16% hinter der zu erwartenden Drucksteifigkeit nach Sandwichtheorie zurück.

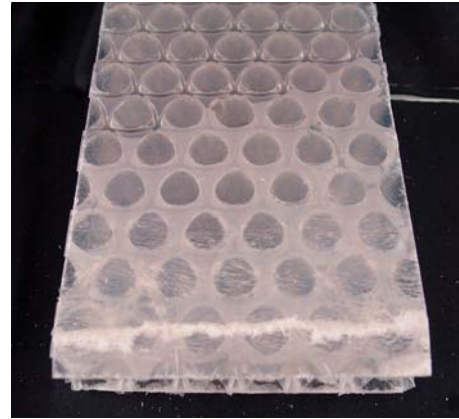


Bild 4.88: Ablösen der GFK-Deckschicht im Fußpunktbereich bei Prüfkörper 1 und resultierender Bruch der Kern- und Deckschicht



Bild 4.89: Das Versagen der Klebefuge in Querrichtung führt zur Ablösung und zum symmetrischen Beulen der Deckschichten von Prüfkörper 2 und Prüfkörper 3 (im Bild)

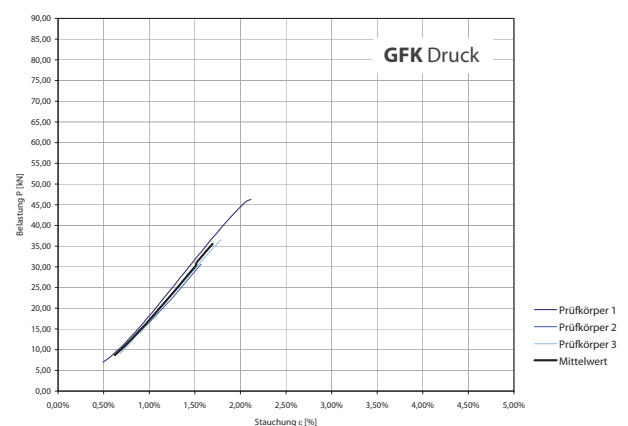


Bild 4.90: Versuchsreihe Biegung mit GFK-Deckschichten - Lastverformungsdiagramm (Versuchsprotokoll im Anhang A68f.)

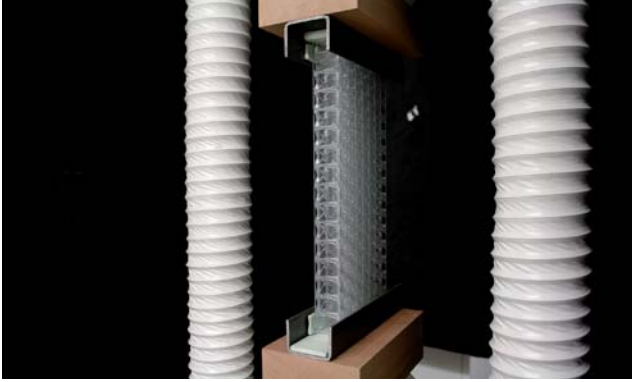


Bild 4.91: Versuchsanordnung: Dünne Zwischenlagen aus Styrodur verhindern den direkten Kontakt der Glas-Deckschichten mit den Auflagerkonsolen aus Stahl

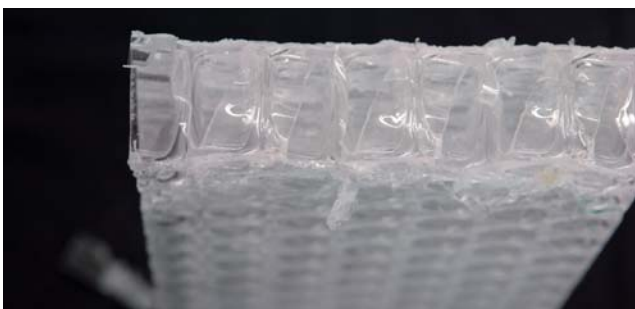


Bild 4.92: Prüfkörper 3: Druckbeanspruchte Stirnseite am Lasteinleitungspunkt mit abstehenden, zusammenhängenden Glaskrümel

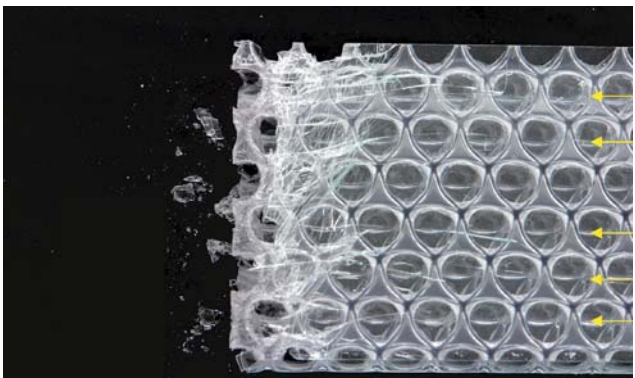


Bild 4.93: Rißgeometrie am Plattenende von Prüfkörper 2: erkennbar sind die parallel verlaufenden Risse und die delaminierte Stirnseite

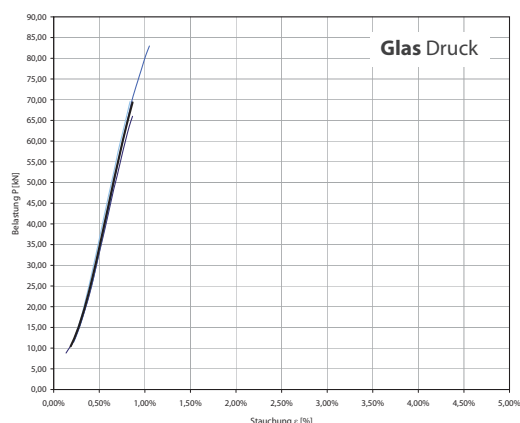


Bild 4.94: Versuchsreihe Biegung mit Floatglas-Deckschichten - Lastverformungsdiagramm (Versuchsprotokoll im Anhang A70f.)

4.4.4.2 Deckschichten aus Floatglas (2 mm)

Die drei Prüfkörper zeigen wie in Bild 4.94 ersichtlich einen gleichförmigen linearen Lastzuwachs. Die Stauchung findet in allen drei Versuchen bis zum Bruch zentrisch statt, ein seitliches Ausweichen oder lokale Instabilitäten konnten zu keiner Zeit festgestellt werden. Die aus den Meßdaten ermittelte Drucksteifigkeit beträgt etwa das siebenfache des Wertes der Referenzplatte aus D07.

Prüfkörper 1 und 2 versagen im Fuß- bzw. Lasteinleitungspunkt und werden bis zum Bruch gefahren. Zur besseren Analyse der Vorgänge an den verdeckten Plattenenden wird der Versuch 3 bei einer Verformung von 20 mm und einer zentrischen Last von 35 kN gezielt abgebrochen. In den ersten beiden Einzelversuchen versagen die Prüfkörper schlagartig bei 74 bzw. 83 kN Bruchlast an der oberen bzw. unteren Kontaktstelle. Bei Prüfkörper 2 bleibt die Bruchkraft noch ca. 10-15 Sekunden aufrecht erhalten. Die Prüfkörper können ohne Abfallen größerer Scherben oder Splitter aus der Prüfmaschine entnommen werden. Nach Herausnahme der Prüfkörper fällt auf, dass die Glas-Deckschichten beidseitig an den Plattenenden gerissen sind. Teilweise haben sich Glaskrümel mit Durchmessern < 2 mm abgelöst und stehen als zusammenhängende Fläche von der Kernschicht ab. Klebstoffreste halten die Krümel zusammen. Das kleinteilige, flächige Bruchbild erinnert ansatzweise an ein gebrochenes Verbundsicherheitsglas, bei der die Glaskrümel an der Verbundfolie hängen bleiben. Der Kern ist an den Stirnseiten leicht gequetscht (Bild 4.92) und weist Kleberrückstände an seinen Kontaktflächen auf.

Die Rißgeometrie an den Plattenenden ist kleinteilig und ungerichtet (Bild 4.93). Von den Stirnseiten verlaufen jeweils beidseitig parallele Risse in Richtung Plattenmitte, die etwa auf einem Viertel der Knicklänge enden. Auffällig erscheint der Abstand und die Lage der Risse. Sie weisen einen regelmäßigen Abstand von einer Wabenbreite auf (ca. 25 mm) und laufen jeweils mittig durch die hintereinander liegenden Wabenöffnungen (Pfeile in Bild 4.93). Prinzipiell ist diese Regel bei allen 3 Prüfkörpern festzustellen. Der bei 20 mm Zielverformung abgebrochene dritte Versuch zeigt, dass zunächst die Glas-Deckschicht in den randständigen Waben reißen, da sie dort unzureichend stabilisiert sind. Die Risse pflanzen sich parallel zur Kraftrichtung in Richtung Plattenmitte fort. Dies erklärt die spezielle Anordnung der Risse in den Glas-Deckschichten.

4.4.4.3 Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse

Versuchsreihen Zentrischer Druck	36 mm + 3D-Wabenkern PC +	2 x 1,5 mm GFK	2 x 2mm Floatglas	2 x 2mm PC*	Zeile Protokoll (Anhang)
Gesamtstärke Sandwich [mm]	$h = t_k + 2 t_d$	39	40	40	2
Querschnittsfläche absolut [cm ²]	A (ca.)	58,5	60	60	1
Drucksteifigkeit D (EA-Wert) [kN]	$D = h dP/du$	2715	10024	1507	
Maximallast [kN]	P_{max}	46,3	83	31,9	
Vergleichskennwerte Steifigkeit					
Drucksteifigkeit pro Meter [kN/m]	$D_0 = D / b$	18102	66827	10048	6
Drucksteifigkeit [kN/m] nach Sandwichtheorie	$D = 2 E_D t_D b$	21600	280000	9200	7
Äquivalenter Druckmodul [kN/cm ²]	$E_{eq} = D / A$	46	167	25	3
Vergleich: Vollplatte [kN/cm ²]	E (Werkstoff Deckschicht)	800	7000	230	4
Leichtbaukennzahlen					
Durchschnittsgewicht Versuchskörper [g]	absolut	600	825	450	8
Vergleich: Vollplatte [g]		3978	5760	2880	9
Gewichtsverhältnis [%]		15%	14%	16%	
Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	$\delta = D / G$	4,53	12,15	3,35	10

Bild 4.95: Statische Kennwerte aus Druckversuch - Materialkombinationen im Vergleich (vgl. Anhang A68 - A70)

* Werte übernommen aus Versuchsreihe B07, vgl. Seite 99

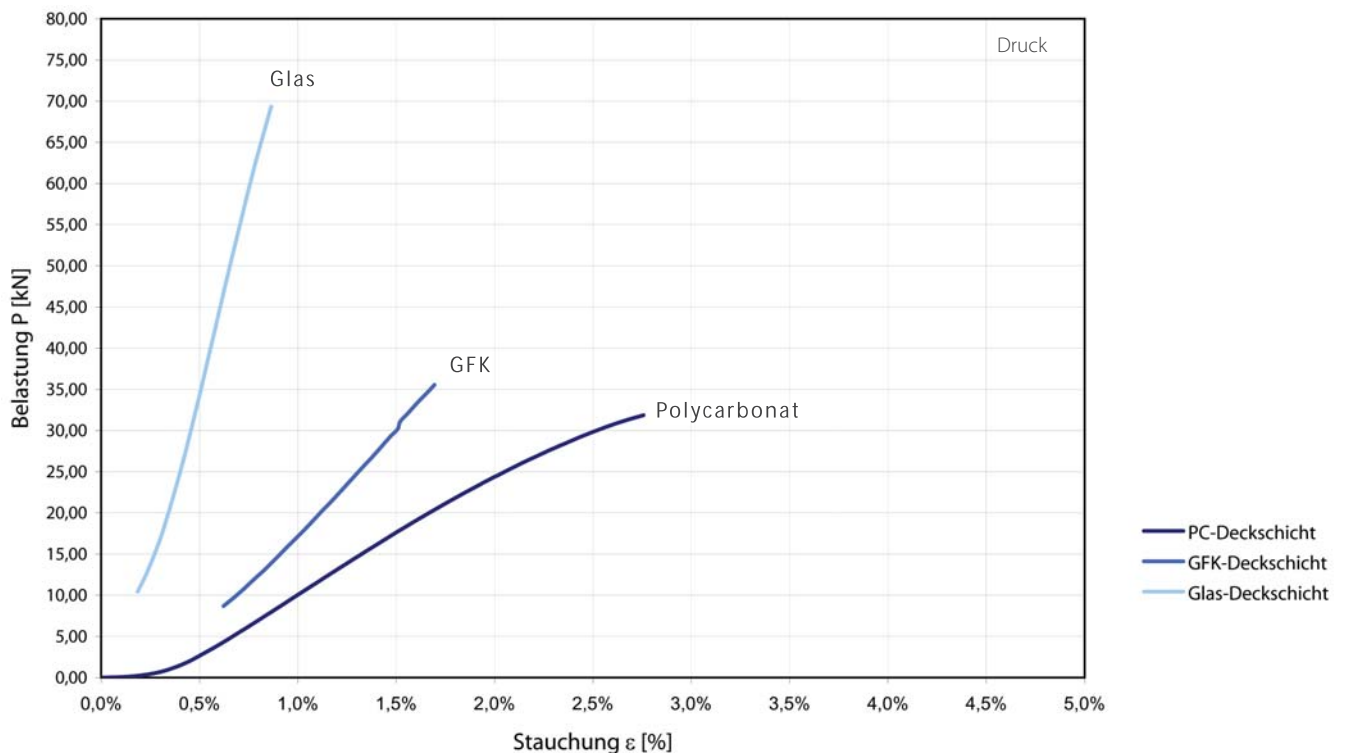
Bild 4.96: Lastverformungsdiagramm aus Druckversuch - Materialkombinationen im Vergleich
Werte für die PC-Deckschicht aus Versuchsreihe D07, vgl. Seite 99



Bild 4.97: Versuchsanordnung zur Analyse der Scheibenwirkung: 3D-Wabenplatte mit GFK-Deckschichten

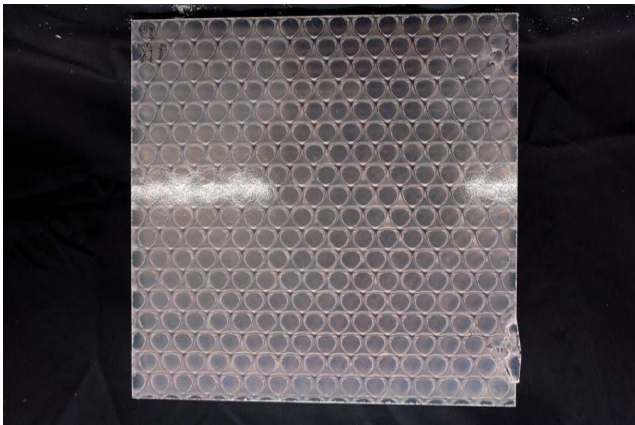


Bild 4.98: GFK-Prüfkörper 1 nach Belastungsversuch: im unteren Einspannbereich (unten rechts) ist das Gefüge durch den Ziehprozess örtlich zerstört.



Bild 4.99: Glassandwich im Abscherversuch nach 10 mm Zielverformung: Ein diagonaler Riß in der Deckschicht pflanzt sich von der oberen Einspannecke in Richtung Lasteinleitungspunkt fort.

4.4.5 Untersuchungen zum Tragverhalten - Abscheren

Die Sandwichstrukturen mit GFK- und Glas-Deckschichten werden in Analogie zu den Belastungsszenarien aus Kapitel 3 auf Abscheren beansprucht. Versuchsanordnung und -durchführung entsprechen vollständig den Ausführungen in Kapitel 3.3.3. Die Prüfkörper haben Abmessungen von 400 x 400 mm. Die Lasteinleitung erfolgt vertikal am freien Rand durch Druck in der unteren Ecke des Prüfkörpers.

4.4.5.1 Deckschichten aus GFK (1,5 mm)

Der azentrische Lastangriff bewirkt zu Beginn bis etwa 0,6 kN Lasteintrag ein linear-elastisches Verformungsverhalten. Ähnlich wie beim Versuchsverlauf der Referenzplatte S07 (S.105) ergibt sich aufgrund der eingeschränkten Klemmwirkung ein langsames, aber stetiges Herausziehen der Prüfkörper aus der unteren Verankerung. Regelmäßige Zwischenmessungen ergeben, dass der Auszugsweg jeweils etwa 25% der Zielverformung beträgt. Die Linearität der Kraft-Wege-Kurve über den gesamten Versuchsverlauf in Bild 4.102 bestätigt diese Beobachtung. Bei 6 mm Auflagerversatz werden die Einzelversuche jeweils abgebrochen. Das Herausziehen geht mit dem Ausreißen der Wabe und der Deckschicht in diesem Bereich einher, wie Bild 4.98 zeigt.

Die Prüfkörper zeigen ansonsten keine Instabilitäten oder bleibende Verformungen. Die Klebefuge ist jeweils vollständig zerstörungsfrei, auch an der Lasteinleitungsstelle in der linken unteren Ecke. Die Stabilität durch die Kernschicht ist gegeben. An der in Kapitel 3.3.3 wiederholt lokalisierten Schwachstelle im oberen Einspannbereich sind keine Verformungen oder Ablöseeffekte der Deckschichten zu erkennen. Die Schubsteifigkeit in der Fläche ist etwas mehr als das Vierfache höher gegenüber der 3D-Wabenplatte mit Polycarbonat-Deckschichten.

4.4.5.2 Deckschichten aus Floatglas (2 mm)

Ähnlich wie beim GFK-Sandwich ergibt sich eine anfängliche linear-elastische Verformung. Aus der Steigung der Kraft-Wege-Kurve ist eine nahezu identische Schubsteifigkeit im Vergleich zum GFK-Sandwich erkennbar.

Bereits ab etwa 2 mm Zielverformung bilden sich Risse in den Deckschichten aus, die je Prüfkörper im Wechsel nur einseitig auftreten. Auffällig erscheint das gleichwertige

Rißbild, das alle drei Prüfkörper aufweisen. Von der oberen Einspannstelle entwickelt sich ein Riß in diagonalen Richtung und pflanzt sich mit fortschreitender Verformung stetig in Richtung Lasteinleitungsstelle an der unteren Ecke fort (Pfeil in Bild 4.99). Gleichzeitig bilden sich von dort Risse in die entgegengesetzte Richtung aus. Es fällt auf, dass die Risse sich nahezu rechtwinklig zur Richtung der Zugspannungen gemäß Bild 4.100 ausrichten.

Die Auszugproblematik äußert sich beim Glassandwich als problematisch: Lokale Spannungsspitzen an den Lochleibungen der Fixierbolzen im Bereich der Einspannung bewirkt das Zerbröseln der Glas-Deckschichten in diesem Bereich (Bild 4.101). Die Glas-Deckschichten können dem Ausziehprozess wenig entgegensetzen, während die GFK- und PC-Deckschichten den Ausziehprozess durch plastische Stauchung des Werkstoffs im Bereich der Lochleibungen noch verzögern konnten.

Aufgrund dieser Problematik und der sich einstellenden Rissgeometrie in den Deckschichten ist der weitere Kraftzuwachs wie in Bild 4.102 ersichtlich nur noch sehr gering. Die Klebefuge ist in der Fläche sowie in den Randbereichen intakt, die gerissenen Glas-Deckschichten bleiben auch bei fortschreitender Verformung vollständig an der stabilisierenden Kernschicht haften.

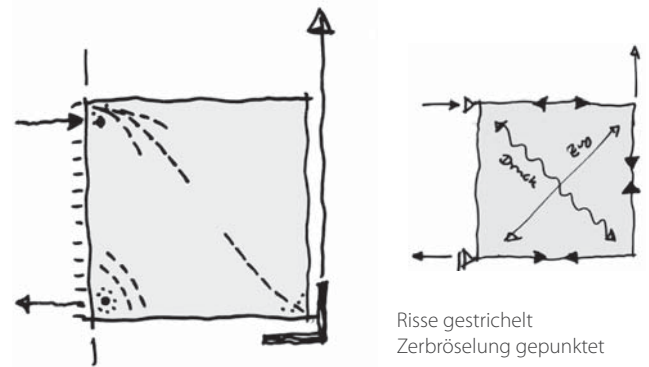


Bild 4.100: Analogie der in den Versuchen festgestellten Rißgeometrie der Glas-Deckschichten zur idealisierten Darstellung der in der Fläche wirkenden Kräfte aus Bild 17, S.77



Bild 4.101: Der Ausziehprozeß bewirkt beim Glassandwich das örtliche Zerbröseln der Deckschicht im Bereich des unteren Fixierbolzens und das Ausreißen der Polycarbonat-Deckschicht

4.4.5.3 Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse

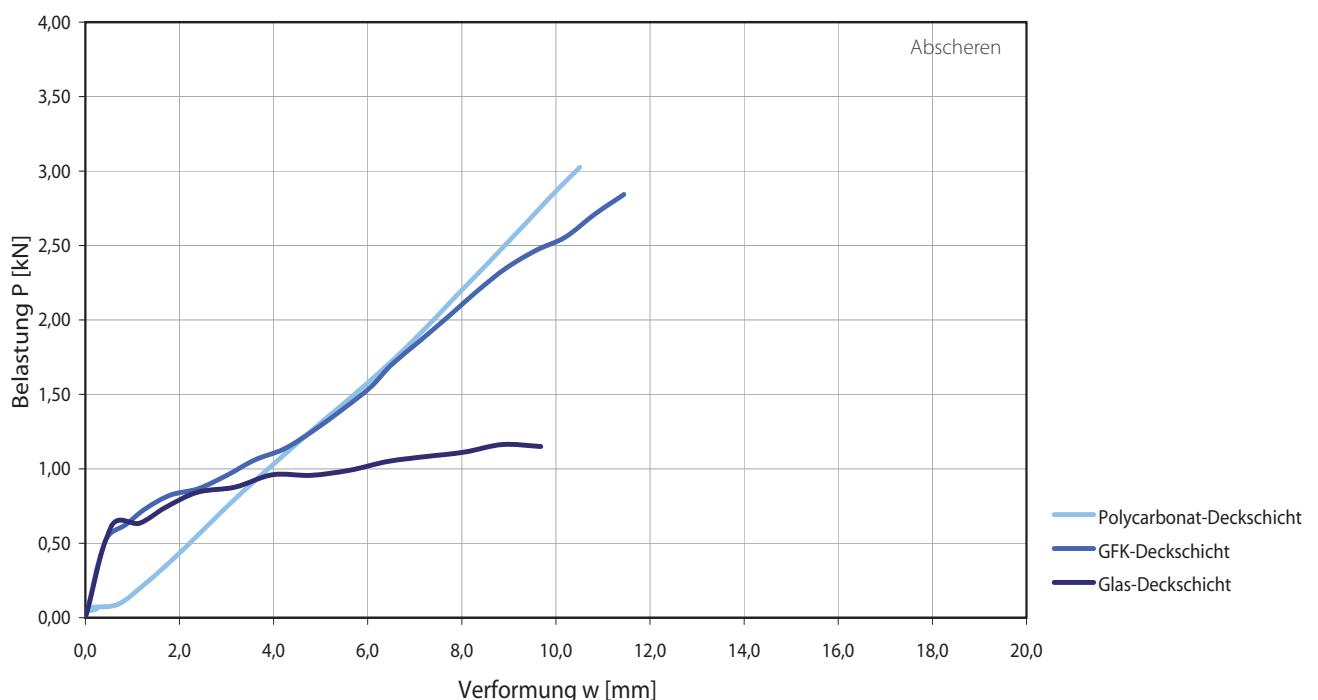


Bild 4.102: Lastverformungsdiagramm aus Abscherversuch - Materialkombinationen im Vergleich (vgl. Anhang A71 - A72)
Werte für die PC-Deckschicht aus Versuchsreihe S07, vgl. Seite 105

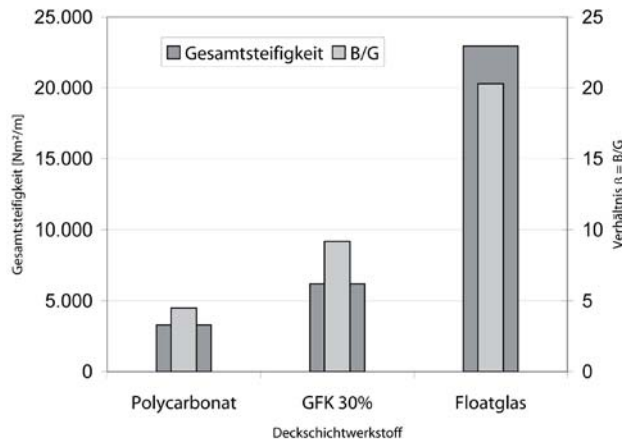


Bild 4.103: Gesamtsteifigkeiten und B/G-Verhältnisse der verschiedenen Sandwichverbünde gleicher Schichtfolgen im Vergleich (Glas+PC als Deckschichtvariante nicht berücksichtigt)

4.4.6 Bewertung der Versuchsergebnisse

In der Gesamtbetrachtung der durchgeführten Traglastversuche ergibt sich ein sehr differenziertes Bild in Bezug auf den statisch-konstruktiven Mehrwert durch Verwendung der alternativen Deckschichtwerkstoffe.

4.4.6.1 Deckschichten aus Glas

Die Versuchsreihen haben gezeigt, dass die Verwendung von Deckschichten aus Glas eine deutliche Steigerung der Trageffizienz des Sandwichverbundes mit sich bringt.

Die hohe Eigensteifigkeit und größere Druckfestigkeit von Glas bewirkt einerseits eine Steigerung des Tragvermögens, besonders bei zentrischer Druckbeanspruchung (Verdoppelung der Bruchlast). Andererseits reduziert sich vor allem bei Biegebeanspruchung die Gesamtverformung um ein Vielfaches. Wie Bild 4.103 zeigt, bewirkt die durch das Glas mitgebrachte Erhöhung des Flächengewichts um 50% eine Steigerung der Biegesteifigkeit um 700% gegenüber Polycarbonat-Deckschichten. Dies sind eindeutige Indizien für eine Steigerung des Sandwicheffekts. Trotzdem sind die maximalen Bruchlasten für Biegebeanspruchungen begrenzt und liegen nur geringfügig über dem Wert von PC-Deckschichten (vgl. Bild 4.87), was auf die begrenzte Biegezugfestigkeit zurückzuführen ist. Hier würde sich durch Verwendung von vorgespannten Gläsern wie „ESG“ oder „TVG“ noch einmal eine wesentliche Laststeigerung¹⁰ einstellen.

Positiv zu bewerten ist der gute Verbund zwischen Glas und Polycarbonat. Der strukturbedingte Kontaktflächenanteil von 35% und das gewählte Klebesystem reichen offensichtlich aus, um den stabilisierenden, schubfesten Verbund auch über den jeweiligen Versagensfall hinaus sicherzustellen. Der Versagensfall tritt in allen drei Belastungsszenarien durch Bruch der biegezugbeanspruchten Deckschichten ein. Polycarbonat-Wabenkern und Klebnaht bleiben dabei aber überwiegend unversehrt und führen dazu, dass das Sandwichgefüge auch nach Versagen der Deckschichten weitgehend intakt bleibt. Das vordergründige Defizit von Glas, bei Sprödbrech in einzelne scharfkantige Scherben zu zersplittern, wird durch die

¹⁰ Die charakteristischen Biegezugfestigkeiten f_{kt} von Einscheibensicherheitsglas (ESG) liegt gemäß [füh03] S.119 bei 12,0 kN/cm², für Teilvorgespanntes Glas (TVG) bei 7,0 kN/cm². Die Werte sind gegenüber Floatglas (4,5 kN/cm²) etwa zwei- bis dreimal so hoch (vgl. Bild 4.53).

flächige Verklebung verhindert. Bis auf kleinere, stumpfkantige Krümel fallen keine Splitter ab. Bei der Variante mit kombinierten Glas-Polycarbonat-Deckschichten war sogar ein vollkommen ablösefreies Bruchversagen zu beobachten. Die gebrochene Glasscheibe verbleibt in ihrer Position, was zudem die Nutzung von Tragreserven begünstigt. Die untersuchten Sandwichverbunde mit Glas weisen große Ähnlichkeiten in Struktur und Verhalten zu Verbund- bzw. Verbundsicherheitsgläsern auf.

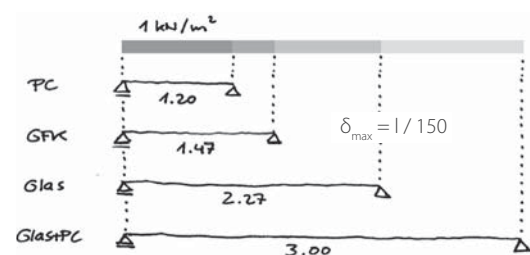
4.4.6.2 Deckschichten aus GFK

Der Sandwichverbund mit GFK-Deckschichten zeigt ebenfalls statisch-konstruktive Verbesserungen gegenüber Polycarbonat-Deckschichten. Diese fallen jedoch nicht so effektiv aus wie bei Verwendung von Glas. Bei Biegebeanspruchung führen die GFK-Deckschichten bei geringer Gewichtssteigerung von 17% immerhin zu einer Verdoppelung der Biegesteifigkeit (vgl. Bild 4.103). Das höhere Dehnvermögen und die besseren Biegezeigenschaften von GFK gegenüber Glas bewirkt die höchste absolute Bruchlast des GFK-PC-Sandwiches bei Biegung, die gemäß Bild 4.96 etwa doppelt so hoch wie bei PC- bzw. Glas-Deckschichten ist. Es stellt sich jedoch die gleiche Endverformung wie beim PC-Sandwich ein. In diesem Zusammenhang ist besonders hervorzuheben, dass die Kernschicht selbst für diese hohen Belastungsspitzen weiterhin gute Stabilitätseigenschaften aufweist.

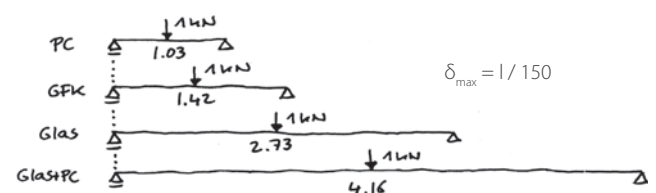
Durch das schlagartige Ablösen der Deckschichten vom 3D-Wabenkern bei Biege- und Druckbeanspruchung bleibt die Nutzung von Tragreserven aus. Konstruktive Schwachstelle ist die Klebnaht. Als Grund darf unter anderem die nicht vollkommen ebene Oberfläche der GFK-Platten zu nennen sein, die eine ähnlich homogene Ausbildung der Klebefuge wie bei Glas- oder PC-Deckschichten beeinträchtigt. Der verwendete Klebstoff scheidet als Ursache eher aus, da in den Vorversuchen sehr gute Haftungsergebnisse erzielt wurden.

4.4.6.3 Leichtbaupotential der Sandwichverbunde

Setzt man die ermittelten Gesamtsteifigkeiten und das jeweilige Flächengewicht zueinander in Relation, so lässt sich das Leichtbaupotential der neuen Sandwichverbunde gegenüber dem Ausgangsverbund feststellen. Das Glas-PC-Sandwich ist gemäß Bild 4.103 bezüglich Biegebeanspruchungen ungefähr viermal, das GFK-PC-Sandwich etwa zweimal so effizient wie der Ausgangsverbund mit Polycarbonat-Deckschichten. Der statisch-konstruktive



- 1. Fall: Flächenlast 1 kN/m^2 (z.B. Wind auf Fassadenfläche)



- 2. Fall: Einzellast mittig 1 kN (z.B. Mannlast)

Bild 4.104: Exemplarischer Vergleich der möglichen Spannweiten l bei einer maximalen Durchbiegung von $l/150$:

40 mm 3D-Wabenplatte mit unterschiedlichen Deckschichtwerkstoffen, 1 m breiter Streifen

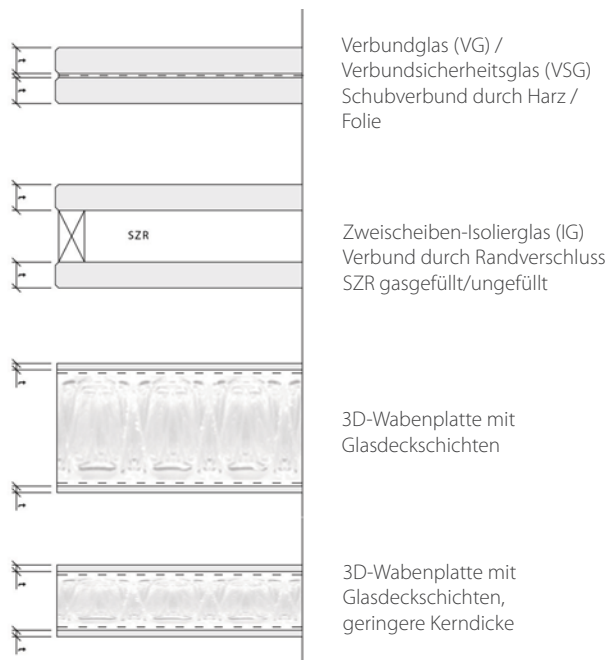


Bild 4.105: Glas-PC-Sandwiche im Vergleich zu anderen Verbund-Elementen aus Glas

Aufbau	Dicke [mm]	Gewicht [kg/m ²]	Biegesteifigkeit $E \times I$ (Nm ² /m)	B/G ***
3D-Wabenplatte PC 2 mm	40	9,1	3299 *	4,5 *
3D-Wabenplatte PC+Glas	44	19,1	53215 *	35,4 *
3D-Wabenplatte Glas 2 mm	40	14	22948 *	20,3 *
Verbundglas 2 x 4 mm	8-10	20	747**	0,5
Verbundglas 2 x 6 mm	12-14	30	2520**	1,0
Verbundglas 2 x 8 mm	16-18	40	5973**	1,9
Verbundglas 2 x 10 mm	20-22	50	11667**	2,9

Bild 4.106: Biegesteifigkeiten und Materialeinsatz im Vergleich:

* Gesamtsteifigkeit aus Meßdaten gemäß Bild 4.95

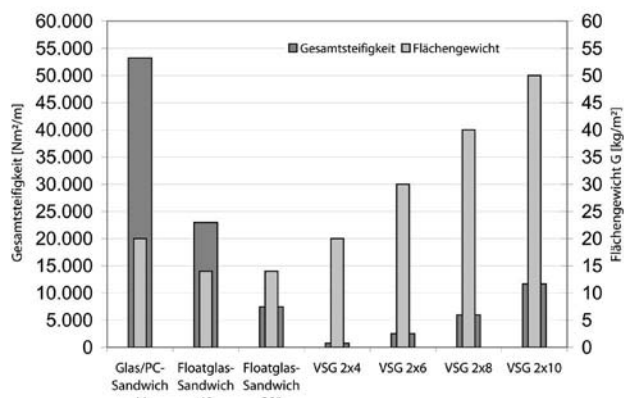
** $I = 2 \times I_{\text{Scheibe}}$ (starrer Verbund nicht berücksichtigt) $E_{\text{Glas}} = 7000 \text{ kN/cm}^2$; $I_{\text{Scheibe}} = bd^3/12$; $b = 1,0 \text{ m}$ *** Verhältniswert $\beta = B/G$ gemäß Gl. (18), S.84

Bild 4.107: Biegesteifigkeiten und Gewichtseinsatz von Glas-PC-Sandwichen im Vergleich zu konventionellen Verbundgläsern

Mehrwert dehnsteiferer Deckschichten wird auch in Bild 4.104 deutlich. Es stellt die möglichen Spannweiten von 40 mm starken 3D-Wabenplatten mit unterschiedlichen Deckschichten für zwei übliche Lastfälle bei Beschränkung der Durchbiegung auf $l/150$ gegenüber.

4.4.6.4 Vergleich zu anderen lichtdurchlässigen Konstruktionselementen aus Glas

Stellt man wie in Bild 4.105 dargestellt einen Vergleich zu konventionellen Konstruktionselementen aus Glas an, so lässt sich das Glas-PC-Sandwich auf den ersten Blick als „gewichtsreduziertes“ Verbundglas mit erhöhtem Widerstandsmoment und Wärmedämmcharakter deuten. Die Lage der Glasplatten zueinander und die resultierende Ausbildung eines Scheibenzwischenraums zeigt Parallelen zu Isoliergläsern. Dessen Verfüllung und die schubfeste Verbindung mit einem Wabenkern aus Polycarbonat zeigt wiederum konstruktionsmorphologische Ähnlichkeiten zu Verbundgläsern. Wie zuvor beschrieben gibt es außerdem große Übereinstimmungen hinsichtlich des Bruchverhaltens. Die bei konventionellen Verbundgläsern garantierte Transparenz kann aufgrund der Kernstrukturierung bei Glas-Sandwichverbunden jedoch nicht gewährleistet werden.

Bild 4.106 und 4.107 zeigen exemplarisch die Biegesteifigkeiten und den jeweiligen Gewichtseinsatz der Glas-Sandwiche im Vergleich zu konventionellen Verbundgläsern. Die Grafik macht das günstige Verhältnis zwischen Gewichtseinsatz und Steifigkeit für die Glas-Sandwiche deutlich. Während die Verbundgläser zur Steigerung der Biegesteifigkeit einen relativ hohen Gewichtseinsatz erfordern, lässt sich die Steifigkeit des Sandwichs durch Variation der Kernschichtdicke bei gleichbleibendem Gewichtseinsatz spürbar erhöhen. Die Nutzung des Trägheitsmomentes macht die Verwendbarkeit vergleichbar geringer Schichtdicken von 2 mm in der Deckschichtlage erst möglich.

Der größere, reine Glasquerschnitt bescheinigt den Verbundgläsern aber ein höheres Belastungspotential bei zentrischer Druckbeanspruchung. Berücksichtigt man jedoch die mögliche Beul- oder Knickgefährdung, so weisen die Sandwiche aufgrund ihrer höheren Trägheitsmomente wiederum Vorteile gegenüber den schlanken Verbundgläsern auf. Zusätzlich ließen sich hier auch die Schichtdicken erhöhen, um den für die Lastabtragung nutzbaren Glasquerschnitt zu vergrößern. Eine Erhöhung würde aber gleichzeitig einen erheblichen Anstieg des Flächengewichtes bewirken und dem maßgeblichen Vor-

teil des reduzierten Gewichtseinsatzes bei Sandwichen entgegenstehen. Zudem ergäbe sich kein wirklicher Mehrwert für die Biegesteifigkeit des Sandwiches, da die Schichtdicke t_D laut Gl. (5) S.73 nur einfach eingeht.

4.5 Zusammenfassung

Die Optimierungsansätze haben gezeigt, dass die 3D-Wabenplatte mit Polycarbonatkern großes konstruktives Potential aufweist.

Die dreidimensionale Struktur des 3D-Wabenkerns lässt sich auf ein vergleichsweise einfaches geometrisches Grundprinzip abstrahieren. Dieses Prinzip birgt in Verbindung mit dem thermopneumatischen Herstellungsprozeß erweiterte Möglichkeiten der geometrischen Differenzierung und Abwandlung. Diese müssten in Verbindung mit der Herstellerseite weiter ausgereizt werden. Gerade unter Einbeziehung digital gestützter Produktionstechniken zur Generierung von Strukturvarianten und zur Herstellung der Werkzeuge (Lochplatten) kommt hier wie in Kapitel 4.3 gezeigt eine besondere Bedeutung zu.

Ungeachtet dessen ist der 3D-Wabenkern aus Polycarbonat in seiner Grundform durch seine gute Eignung als stabilisierende Kernschicht gekennzeichnet, wie die diversen statischen Versuchsreihen zur Kernschicht erkennen lassen. Zudem lässt er sich aufgrund seines hohen Kontaktflächenanteils auch sehr gut mit anderen transparenten Materialien zu ästhetisch ansprechenden, lichtdurchlässigen Sandwichverbunden verkleben.

Die Optimierung der Deckschichtlage hat gezeigt, dass die mit Glas- bzw. GFK-Deckschichten versehenen 3D-Wabenplatten grundsätzlich als Alternative für konventionelle lichtdurchlässige Konstruktionselemente wie Verbund- oder Isoliergläser in Frage kommen können. Sie verknüpfen die Vorteile des Schubverbundes mit den Vorteilen eines für Wärmedämmung oder andere Funktionen nutzbaren Scheibenzwischenraums.

Aufgrund der Strukturierung sind die Sandwichkonstruktionen jedoch nicht für Anwendungen geeignet, bei denen ein vollkommen transparentes Erscheinungsbild gefordert wird. In Kapitel 5 werden abschließend erweiterte Anwendungsspektren und Strategien des Fügens für die in diesem Kapitel untersuchten Sandwichverbunde aufgezeigt.

5. Die 3D-Wabenplatte als Konstruktionselement

5.1 Erweiterte Anwendungsspektren

In Kapitel 5 wird die Eignung der 3D-Wabenplatte als Konstruktionselement untersucht. Neben dem Aufzeigen von Anwendungsfeldern des Bauens steht vor allem die Untersuchung erweiterter Möglichkeiten für tragende Anwendungen im Vordergrund, die das in Kapitel 3 und 4 festgestellte statisch-konstruktive Potential nutzen. In diesem Zusammenhang sollen außerdem materialgerechte Strategien des Fügens aufgezeigt und anhand von Modellversuchen auf ihre konstruktiven, funktionalen und gestalterischen Qualitäten hin untersucht werden.

Thema dieses Abschnitts ist die Eignungsuntersuchung der 3D-Wabenplatte als Konstruktionselement unter Berücksichtigung unterschiedlicher Deckschichtkonfigurationen für verschiedene Anwendungsgebiete des Bauens. Es gilt zu klären, welche Anforderungen die unterschiedlichen Einsatzgebiete an den jeweiligen konstruktiven Einsatz stellen und welcher Mehrwert sich wiederum aus der Verwendung der 3D-Wabenplatte ergibt.

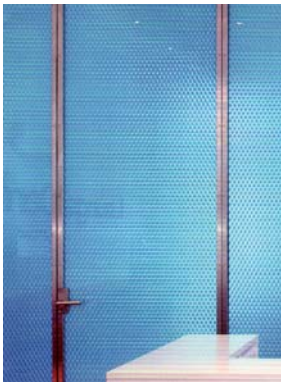
Gängig ist die Verwendung von transluzenten 3D-Wabenplatten mit Polycarbonat-Deckschichten im Innenausbau, ansatzweise wurde darauf bereits in Kapitel 2.2.3.2 (S.53f.) eingegangen. In der Gebäudehülle gibt es wie in Kapitel 2.3.1 gezeigt ebenfalls erste Ansätze, die ausbaufähig erscheinen. Das in Kapitel 3 und 4 festgestellte, gute statisch-konstruktive Verhalten der 3D-Wabenplatte in Verbindung mit entsprechenden Deckschichtmaterialien bietet besonderes Potential für Bauteile mit Trageigenschaften oder für primäre Konstruktionselemente von raumbildenden Tragstrukturen. In einer einleitenden Übersicht wird eine erste, vergleichende Prognose über die Eignung für die verschiedenen Anwendungsbereiche gegeben.

Die Grundeigenschaften der 3D-Wabenplatte, lichtdurchlässig zu sein und als scheibenförmiges Konstruktionselement zur Verfügung zu stehen, bestimmt die in Bild 5.03 aufgeführte Auswahl an potentiellen Anwendungsspektren. Nicht ungewöhnlich erscheint daher eine große Übereinstimmung mit Anwendungsformen des (konstruktiven) Glasbaus.

5.1.1 Innenausbau

Der Innenausbau stellt zur Zeit das Hauptanwendungsgebiet dar. Dabei kommen bisher ausschließlich PC- oder PMMA-Deckschichten zum Einsatz. Meist werden die Elemente mit Holzbauschrauben durch Verbindung der Deckschichten gefügt. Die spanende Verarbeitbarkeit macht die Verwendung wie bei Holzwerkstoffen möglich. Glasfaserverstärkte Kunststoffe in der Deckschichtlage sind diesbezüglich auch geeignet. Beschläge zur Verbindung der Platten untereinander werden meist mit gewindeschneidenden Schrauben des Holzmöbelbaus einschnittig in den Deckschichten verankert.

Trennwände, soweit nicht als Absturzsicherung vorgesehen, werden bisher vor allem im Messebau oder Bürobereich mit 3D-Wabenplatten realisiert und ermöglichen Lichtdurchlässigkeit bei gleichzeitiger Blickdichtheit sowie die Inszenierung mit Licht. Die Platten werden als Ausfachung zwischen Stützprofilen oder auch ohne Unterkonstruktion durch zwängungsfreie Lagerung im Fuß- und Kopfpunkt des Raumes konzipiert. Die Platte sollte Stoßlasten quer zur Platte aufnehmen können. Andere Deckschichtmaterialien sind denk-



Bilder 5.01 und 5.02:
Gängige Anwendungen im
Innenausbau, 3D-Wabenplatten
mit PC-Deckschichten

Anwendung Bereich / Örtlichkeit		Konstruktive Anforderungen / Einwirkungen	3D-Wabenplatte PC/PMMA-Deck- schicht	3D-Wabenplatte GFK-Deckschicht	3D-Wabenplatte Glas-Deckschicht	3D-Wabenplatte Glas+PC-Deck- schicht
Innenausbau	Tür- und Fensterfüllungen Innen und Außen	nicht tragend ggf. Wärme- und Witterungsschutz	eingeschränkt bei Bewitterung	eingeschränkt bei Bewitterung	ja	ja
	Unterdecken Innenausbau Messebau	nicht tragend	ja	ja	ja	ja
	Trennwände Innenausbau Messebau	nicht primär tragend Stoßlasten	ja	ja	ja	ja
	Möbel- / Objektbau Innen und Außen	nicht tragend / selbsttragend	ja	ja	eingeschränkt nicht spanend bearbeitbar	eingeschränkt nicht spanend bearbeitbar
Gebäudehülle	Kaltfassade Vorhangfassade Außenhaut	nicht primär tragend Witterungsschutz Winddruck/-sog	ja	ja	ja	ja
	Warmfassade 	nicht primär tragend Wärme- und Witterungsschutz Winddruck/-sog	eingeschränkte Dichtigkeit	eingeschränkte Dichtigkeit	ja dicht	ja dicht
	Stoßfeste Verglasungen 	nicht primär tragend ggf. Wärme- und Witterungsschutz	ja PC schlagzäh	ja GFK schlagzäh	eingeschränkt mit ESG	ja PC schlagzäh
	Sport- / Industriebauten Sicherheitsbereiche 	Winddruck/-sog Stoßlasten				
Traglelemente	Geländer Brüstungen Eigenlast Holm-/Stoßlasten	tragend 	nein	nein	ja vgl.bar mit VG / VSG	ja vgl.bar mit VG / VSG
	Treppenstufen Böden / Podeste Innenausbau Messebau	tragend Eigenlast Verkehrslasten	eingeschränkt mit UK für nicht absturzfäh- rdete Podeste	eingeschränkt mit UK für nicht absturzfäh- rdete Podeste	ja Verbessertes Tragverhalten Biegung mit ESG/TVG	ja Verbessertes Tragverhalten Biegung mit ESG/TVG
Tragwerke	Dachkonstruktionen Vordächer Gebäudehüllen	tragend ggf. Wärme-/Witterungsschutz Eigenlasten Winddruck/-sog Schneelasten	eingeschränkt bei Bewitterung, wegen Langzeitbelastungen	ja	ja Verbessertes Tragverhalten Biegung mit ESG/TVG	ja Verbessertes Tragverhalten Biegung mit ESG/TVG
	Raumbildende Tragstrukturen Messebau Kleingebäude	tragend ggf. Wärme-/Witterungsschutz Eigenlasten Winddruck/-sog Schneelasten	eingeschränkt bei Bewitterung, wegen Langzeitbelastungen	ja	ja Verbessertes Tragverhalten Biegung mit ESG/TVG	ja Verbessertes Tragverhalten Biegung mit ESG/TVG

Bild 5.03: Prognose zur konstruktiven Eignung der 3D-Wabenplatte für verschiedene Anwendungsbereiche des Bauens (bisheriger Einsatz grau hinterlegt)



Bilder 5.04 und 5.05:
Anwendungen im Möbel- und
Objektbau, 3D-Wabenplatte mit
PC/PMMA-Deckschichten

bar. Bei der Verwendung von Glasdeckschichten sollten die Bruchstücke im Versagensfall wie bei einem Verbundsicherheitsglas im Gefüge verbleiben.

Für lichtdurchlässige Türen und Fensterfüllungen werden die Platten wie Glasscheiben umlaufend gelagert und verklotzt. Platten größerer Stärke von 30-40 mm sind als selbsttragende Türblätter mit integrierten Beschlägen denkbar. Hier wird dann ein umlaufender Kantenverschluss, unter anderem zur Ausbildung eines Türanschlages notwendig.

Ein weiteres Anwendungsfeld sind Unterdecken, vor allem für Beleuchtungszwecke. Die Kernstruktur streut das Licht und läßt Lichteffekte zu. Neben der Verwendung von thermoplastischen Deckschichten sind auch Glas und PC denkbar. Bei Glas müsste jedoch wie bei allen „liegenden“ Anwendungen geprüft werden, ob die Verbundwirkung in sicherheitstechnischer Hinsicht einer VSG-Scheibe gleichkommt. Mit Glas- oder GFK-Deckschichten wären so größere Spannweiten denkbar, da nur das Eigengewicht der Platte abgetragen werden muss. Die Lagerung der Platten könnte zum Beispiel punktuell durch nicht sichtbare Hinterschnittanker (in den Kern einbindend) oder Auflageprofile erfolgen.

Im Möbelbau/Objektbau sind Anwendungen mit PC-Deckschichten gängig. Dabei geht es meist um die flächige Inszenierung der Wabenstruktur mit Licht. Der ästhetische Wert des Glas-Wabenkern-Verbundes könnte als Tischplatte, Tür oder Regalboden, für Objekte des Ladenbaus oder allgemein für den Innenausbau besonders gut zur Geltung kommen (Bilder 5.04 und 5.05). Der große Nachteil besteht hier jedoch in der Verarbeitbarkeit, da sich das Glassandwich nachträglich nicht spanend bearbeiten lässt.

Allgemein bietet gerade der Objekt- und Möbelbau großes Potential für integrierte Füge-techniken in der Kernschicht. Für Objekte, bei denen die Platten selbsttragend zur Anwendung kommen können, ließen sich Steck- oder Füllemente in der Kernschichtebene zur kraftschlüssigen Verbindung anordnen.

5.1.2 Gebäudehülle

Besondere Anforderungen in die Gebäudehülle sind Witterungsschutz und -beständigkeit. Die Hülle muß zudem Lasten aus Winddruck und-sog aufnehmen können. Mit PC-Deckschichten gibt es einige wenige Anwendungen der 3D-Wabenplatte als vorgehängte Fassade, erste Anwendungen wie in Kapitel 2.3 gezeigt auch im Bereich der Warmfassade (Fensterfabrik Hagendorn). Hier ist erkennbar, dass der Vorteil in der Ausbildung sehr großer Plattenabmessungen und der Nutzung hermetisch abgeschlossener Kernwaben als integrierte Wärmedämmschicht liegt. Bei Verwendung von dehnweichen PC-Deckschichten ist dies allerdings mit sehr großen Plattendicken verbunden (im gezeigten Fall 80 mm). Zudem ist die Fassade durch den großen Dachüberstand vor extremer Bewitterung geschützt. Es lassen sich somit keine Erfahrungswerte über exponiertere Fassadenanwendungen zur Beurteilung der Witterungsbeständigkeit heranziehen.



Bilder 5.06 und 5.07:
Geklemmte Fassade und
Türausfachungen, Fensterfabrik
Hagedorn (vgl. Kapitel 2.3.1)

Der alternative Einsatz von steifen Glas- oder Glas+PC-Deckschichten würde die Tragfähigkeit gegenüber Windlasten deutlich erhöhen und könnte geringere Plattendicken möglich machen, die sich im Bereich gewöhnlicher Isolierverglasungen mit Gesamtstärken um 30-40 mm bewegen könnten. Außerdem trägt gerade Glas in der Deckschichtebene zu einem verbesserten Witterungsschutz und -beständigkeit bei. Die bei einer großen Fläche festgestellte Welligkeit der PC-Deckschicht aufgrund thermischer Einwirkungen bei

dem Projekt in Hagendorn ließe sich zudem durch Verwendung von Glasdeckschichten vermeiden. Da das Glas-Waben-Sandwich wie in Kapitel 4.3 gezeigt große Ähnlichkeiten zum Tragverhalten von Verbund- bzw. Verbundsicherheitsgläsern aufweist, besitzt es auch Potential für Schrägverglasungen.

Externe Füge Techniken wie konventionelle Fassaden-Klemmsysteme mit thermischer Trennung ließen sich auch für alle Sandwichvarianten problemlos anwenden. Einschränkungen gäbe es hier jedoch bei großen Kerndicken, da der Klemmdruck die bei erhöhter Kerndicke sinkende Quersteifigkeit ggf. übersteigen und die Klemmwirkung dadurch über die Zeit nachlassen könnte. Projektbezogene Erfahrungswerte gibt es aufgrund der kurzen Standzeiten der wenigen realisierten Fassaden noch nicht. Integrierte Füge Techniken sind eher für Kaltfassaden geeignet, da hier die Anforderungen an Gasdichtigkeit und Wärmedämmwirkung wegfallen. Hier ließen sich durch Implementierung von Beschlägen in der Kernlage sehr reduzierte Lösungen herstellen, ggf. mit Tragwerksrelevanz. Ein möglicher Ansatz für integrierte Lösungen bei Warmfassaden wird in Kapitel 5.2 aufgezeigt.

Grundsätzlich ist der Einsatz der tranluzenten 3D-Wabenplatten nur dort sinnvoll, wo vollständige Transparenz in der Fassadenebene nicht gefordert ist. Auf der anderen Seite haben die Sandwiche aufgrund der lichtbrechenden Kernstruktur Potential für blendfreies und gleichmäßig verteiltes Tageslicht auf der Innenseite der Fassade zu sorgen. Einsatzbereiche wären zum Beispiel lichtdurchlässige Brüstung- und Sturzzonen für Bandfassaden, lichtdurchlässige Außenwände für Treppenhäuser, Arbeits- und Laborräume, Museumsräume, abgeschlossene oder offene Betriebsräume, Fertigungs- und Lagerräume, tiefe Räume mit großen Raumhöhen. Zudem kann der großformatige Einsatz im Außenwandbereich von schlecht belichteten Wohnräumen (z.B. auf der Nordseite) zur Verbesserung der Tageslichtsituation bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung von Privatsphäre beitragen.

Für Gebäudehüllen von Sport- oder Industriebauten, bei denen eine besondere Stoßfestigkeit verlangt wird, macht der Einsatz von Polycarbonat-Deckschichten aufgrund seiner hohen Schlagzähigkeit Sinn. Aber auch GFK eignet sich, wie in Kapitel 4 gezeigt, gut als Deckschichtlage gegenüber Stoßlasten. In Bezug auf die häufig gleichzeitig geforderten Eigenschaften wie Dichtigkeit und Witterungsbeständigkeit kommen aber besonders Glas + PC als kombinierte Deckschichtlagen in Betracht. Hier könnten sich die Werkstoffvorteile Schlagzähigkeit von Polycarbonat in der Zwischenlage und Dehnsteifigkeit/Witterungsbeständigkeit von Glas in der äußersten Lage sehr gut ergänzen. In diesem Zusammenhang wären auch Anwendungen für Sicherheitsverglasungen denkbar, bei der der kombinierte Sandwichverbund für einen entsprechenden Schutz in bezug auf Durchschuß- oder Einbruchssicherheit sorgen könnte. Hier erscheint der Einsatz einer möglichst integrierten Füge Technik aus funktionaler Sicht angebracht. Das Anwendungspotential müsste aber im konkreten Einzelfall auf Grundlage der von baurechtlicher Seite geltenden Anforderungen genauer untersucht werden.

5.1.3 Tragelemente

Praktische Anwendungen, bei denen die Trageigenschaften der 3D-Wabenplatte gezielt ausgenutzt werden, gibt es bisher nicht. Ein potentiell Einsatzgebiet besteht in der Nutzung der 3D-Wabenplatte als seitliche Absturzsicherung. Dabei ließe sich das Sandwich als tragende Brüstung (Holm- und Stoßlasten) oder als flächige Ausfachung einer Geländerkonstruktion (nur Stoßlasten) verwenden. Die jeweiligen statischen Anforder-

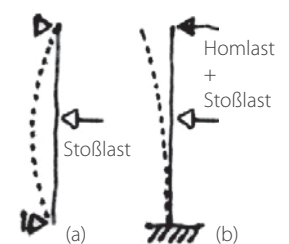


Bild 5.08:
Statische Systeme bei Verwendung als Füllelement (a) oder als tragende Brüstung (b)

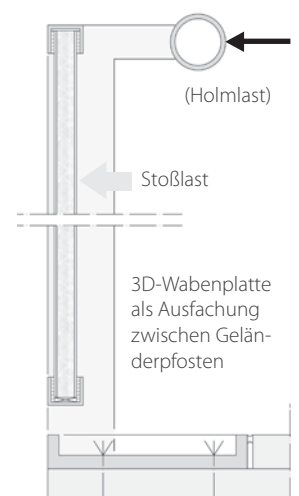


Bild 5.09:
Sandwich als Füllelement (a):
Prinzipskizze der konstruktiven Ausführung

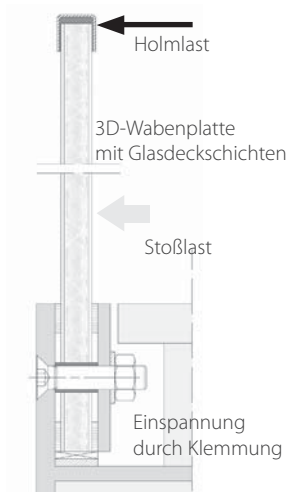


Bild 5.10:
Tragende Brüstung (b):
Prinzipische Skizze zur konstruktiven
Ausführung

Tragende Brüstung

Überschlägige statische
Vergleichsrechnung

$h_{\min} = 90 \text{ cm}$ (unter 12 m Ab-
sturzhöhe) nach MBO §38
Anpralllast Holm $P = 1 \text{ kN}$
nach DIN 1055-3

Effektive Einspannlänge
ca. $90 + 5 = 95 \text{ cm}$

Biegemoment am Holm:
 $M = P \cdot h = 1 \cdot 95 = 95 \text{ kNcm}$

1. VSG 2x10 mm SPG ohne Schubverbund

$g = 50 \text{ kg/m}^2$
 $f_{kt} = 4,5 \text{ kN/cm}^2$ (zul $\sigma = 1,8$)
 $E = 7000 \text{ kN/cm}^2$

$W = 2 \cdot b \cdot t^2 / 6 = 67 \text{ cm}^3$
 $\sigma_{\text{Zug}} = M/W \sim 1,4 \text{ kN/cm}^2$
 $\delta_{\max} = P \cdot l^3 / 3 \cdot E \cdot I \sim 2,5 \text{ cm}$

2. 3D-Wabenplatte 20 mm mit 2 mm SPG-Deckschichten

$g = 14 \text{ kg/m}^2$
 $B \sim 80000 \text{ kNcm}^2$ (S.152)
(Schubverform. berücksichtigt)

$W = d \cdot t \cdot b = 65 \text{ cm}^3$
 $\sigma_{\text{Zug}} = M/W \sim 1,4 \text{ kN/cm}^2$
 $\delta_{\max} = P \cdot l^3 / 3 \cdot B \sim 3,3 \text{ cm}$

Bild 5.11:
Tragende Brüstung: statischer
Vergleich VSG / 3D-Wabenplatte

rungen gestalten sich unterschiedlich, wie Bild 5.08 zeigt. Eine Prinzipskizze macht die Anwendung als tragende Brüstung deutlich (Bild 5.10), die eine Einspannung am Fußpunkt zur Aufnahme des Biegemoments erfordert. Aufgrund der größeren Verformungen und aus brandschutztechnischen Gründen scheiden PC oder GFK als Deckschichtwerkstoffe eher aus. 3D-Wabenplatten mit Glasdeckschichten oder mit kombinierten Glas+PC-Deckschichten könnten bei größerer Kerndicke aufgrund ihres daraus resultierenden höheren Widerstandsmoments eine Alternative für klassische Glasbrüstungen aus Verbundsicherheitsglas (VSG) darstellen.

Die „technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen (TRAV)“¹ diktiert die Bemessung und Ausführung für tragende Glasbrüstungen. Danach darf das Element unter Anpralllast nicht durchstoßen werden und es dürfen keine Glasstücke auf eine darunter liegende Verkehrsfläche fallen. Hier stellt sich die Frage, in welcher Weise sich diese Vorgabe auch durch eine sehr viel leichtere Sandwichkonstruktion mit Glas-Deckschichten realisieren ließe. Die Vergleichsrechnung in Bild 5.11 macht deutlich, dass ein 20 mm starkes Sandwich mit 2 mm Spiegelglas-Deckschichten etwa die gleiche Biegezugfestigkeit σ aufweist wie ein 2x10 mm starkes VSG. Die Verformung δ ist zwar etwas höher, ließe sich aber durch eine geringfügige Erhöhung der Kerndicke abmildern. Die Glasdicken könnten erheblich reduziert werden und damit das Gewicht auf ca. 30% gesenkt werden. Eine Resttragfähigkeit ist, wie in Kapitel 4.3 gezeigt wurde, ebenfalls gegeben. Die konstruktive Ausbildung der Einspannung kann fügetechnisch analog zu Glasbrüstungen erfolgen. Der für die Fügung notwendigen Bohrungen würde jedoch eine tragende Verwendung von Spiegelglas nach der „TRAV“ entgegenstehen. Die Klemmung müßte daher gegebenenfalls ohne Bohrung oder unter Verwendung von ESG ausgeführt werden. Die durch die Querschnittsbreite des Sandwichs definierte obere Stirnfläche der Brüstung ließe sich durch Kantenverschluss (z.B. PC) direkt als Holm nutzen (scharfe Kanten vermeiden). Es könnte auch ein durchlaufender Holm durch kraftschlüssige Klebung aufgesetzt werden (Bild 5.10), der die Holmlast bei Ausfall eines Elements auf die Nachbarplatten überträgt (nach TRAV Kategorie B). Ergebnis wäre eine materialgerechte und ansprechende Lösung.

Die Verwendung als Füllelement zeigt Bild 5.09 (Kategorie C nach TRAV). Das Sandwich-element müßte lediglich Stoßlasten widerstehen, die Holmlasten würden durch die Geländerkonstruktion abgetragen. Auf zusätzliche Bohrungen könnte verzichtet werden und ein Stirnseitenverschluss wäre nicht zwingend notwendig. Die Platten ließen sich beispielsweise punktwise mit Klemmhaltern umlaufend an den Geländerpfosten fixieren. Interessante Anwendungsfelder sind Treppen- und Steggeländer sowie Galerien, aber auch konventionelle Balkonbrüstungen (Blickdichtheit des Sandwichs schafft Privatsphäre). Lichtdurchlässige, aber blickdichte Brüstungen zur Absturzsicherung aus transluzenten Glas-Waben-Sandwichen könnten auch wie bereits erwähnt in Fassadensystemen Anwendung finden. Im konkreten Anwendungsfall wird zu klären sein, in wie weit sich die Anforderungen der TRAV auf die Sandwichverbünde übertragen lassen.

Eine weitere Anwendung für den tragenden Einsatz stellen Treppenstufen, begehbare Podeste, sowie Fußböden von Stegen und Balkonen dar. Anwendung finden bereits 30-50 mm dicke PC-Sandwiches für Podeste ohne Absturzgefahr im Messebau. In Deutschland ist für begehbare Verglasungen eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich, wenn Absturzge-

fahr besteht. Sie sind aus VSG mit mindestens 3 Glasscheiben herzustellen² und erreichen dann häufig Gesamtstärken von 30-40 mm.

Die Verwendung der 3D-Wabenplatte als biegebeanspruchtes Tragelement erscheint hier zweckmäßig. Vom Tragverhalten her kommt vorrangig Glas als Deckschichtmaterial in Betracht. Polycarbonat scheidet aufgrund seiner geringen Dehnsteifigkeit eher aus, GFK ist in größerer Schichtdicke denkbar. Der Biegeversuch der 40 mm starken Wabenplatte mit 2 mm Glasdeckschichten aus Kapitel 4.3.2 gibt gute Vergleichskennwerte für eine erste Einschätzung zur Eignung vor (Bild 5.12): Die Durchbiegung bei 2 kN Mannlast (57% der Bruchlast) beträgt nach Bild 106, S.144 ca. 5 mm (0,6%) und bleibt damit weit unter dem empfohlenen zulässigen Wert von 1% der Spannweite³. Da die zu erwartende Stufentiefe größer als die Prüfkörperbreite von 15 cm sein wird, ist mit noch günstigeren Werten zu rechnen. Die Stufe verfügt zudem über eine Resttragfähigkeit im Versagensfall. Die linienförmige Lagerung erfolgt seitlich mit Mindesteinstand, um Kerbspannungen auf der zugbeanspruchten Unterseite zu vermeiden. Die Lagesicherung der Platte kann seitlich im Polycarbonat-Kern oder von der Unterseite her durch punktweise Verschraubung erfolgen. Die Stirnseiten sollten verschlossen werden, die Plattenkanten geschützt sein, um die Verletzungsgefahr zu minimieren.

Fraglich erscheint bei Glas-Deckschichten die Gebrauchsbständigkeit gegenüber temporären Stoßlasten. Hier könnten GFK- oder kombinierte Glas-PC-Deckschichten zu einer Verbesserung führen. Die in Kapitel 4.1.2.2 festgestellte Abnahme der Quersteifigkeit bei steigender Kerndicke begrenzt die Stufenhöhe. Der Einsatz im Außenbereich ist jedoch fraglich, da die Abdichtung der Schichtfugen bei liegender Anwendung aufwendig erscheint (vgl. S.53). Zudem stellt der PC-Wabenkern für die Brandbeständigkeit eine Schwachstelle dar, was das Anwendungsfeld auf nicht sicherheitsrelevante Verkehrsflächen einschränkt.

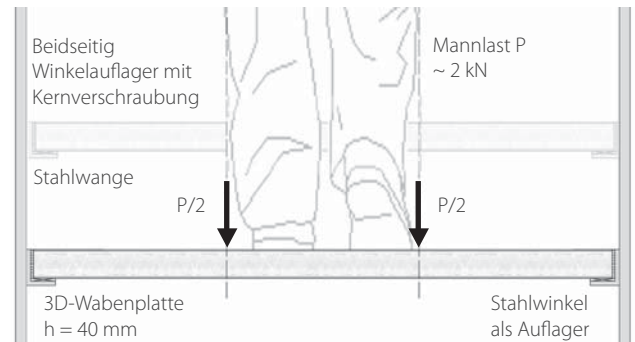


Bild 5.12: Querschnitt durch die „Sandwich“-Stufe: Analogie des Tragsystems und des Lastfalles zu den Biegeversuchen aus Kapitel 4.3.2

2 [hes05 S.81f.

3 zul δ für Linienlagerung zwei- und dreiseitig [fue03] S.120

5.1.4 Tragwerke

Bisher sind keine praktischen Anwendungen bekannt, bei denen die 3D-Wabenplatte als tragendes Konstruktionselement für raumbildende Strukturen oder Dachkonstruktionen verwendet wurde. Der nachgewiesene quasi-isotrope Charakter mit gleichwertigen Trageigenschaften in seinen drei Hauptrichtungen und die guten Steifigkeitseigenschaften machen den Einsatz der Platte als Grundelement für ebene und räumliche Flächentragwerke interessant. Wie in Kapitel 3 und 4 gezeigt, können die Platten grundsätzlich auf Biegung, zentrischen Druck und Abscheren beansprucht werden.

Vier grundlegende Einsatzmöglichkeiten von 3D-Wabenplatten bei Tragstrukturen werden im folgenden vorgestellt:



Bild 5.13:
Projektstudie für ein Scheibentragwerk aus 3D-Wabenplatten mit Polycarbonat-Deckschichten, Projekt „Living Box“, Köln 2006 (vgl. S.165).



Bild 5.14:
Faltnetzstudie 2007 an der ABK Stuttgart, Durchmesser ~ 10 m

- Raumbildende Scheibentragwerke

Hier werden 3D-Wabenplatten als Primärtragelemente vertikal und horizontal so zueinander angeordnet werden, dass sie sich gegenseitig in ihrer Lage linear stützen. Die Elemente könnten dabei als Wände, Decken oder Böden auch gleichzeitig bauphysikalische Funktionen übernehmen. Die geeignete räumliche Anordnung der Scheiben steift die Tragstruktur aus und gewährleistet die Grundstabilität. Die statisch-konstruktive Notwendigkeit an Füge-technik beschränkt sich dann auf die Lagesicherung der Scheiben untereinander. Für die resultierenden Stoßgeometrien bieten sich daher integrierte Füge-techniken an, wie eine Projektstudie in Kapitel 5.2.3 aufzeigt (Bild 5.13). Die Bauweise ist besonders für temporäre Messe- und Ausstellungsbauten sowie Kleingebäude (Pavillons etc.) geeignet.

- Räumliche Flächentragwerke:

Bei Tonnen, Schalen oder Kuppeln kann die 3D-Wabenplatte als primär tragendes und hüllendes Grundelement Verwendung finden. Das Tragvermögen und die Gesamtstabilität der jeweiligen Struktur wird durch die gegenseitige Stützung der räumlich angeordneten Plattenelemente gewährleistet. Den geeigneten Konstruktionsstyp bei Verwendung von Plattenwerkstoffen stellt das Faltnetz dar (Bild 5.14), bei dem sich die angrenzenden Platten durch Ausbildung einer Falte gegenseitig stabilisieren. Die überwiegend in der Fläche wirkenden Kräfte beanspruchen das Sandwichelement hauptsächlich in den Deckschichten auf Druck und Abscheren. Zur Aktivierung der Flächentragwirkung müssen die Platten all-

seitig linear miteinander gekoppelt werden. Die 3D-Wabenplatten eignen sich für diese Art von Strukturen, da sie wie in Kapitel 4 gezeigt auch bei größeren Dicken ein vergleichsweise geringes Flächengewicht aufweisen (was für Flächentragwerke Grundvoraussetzung ist). Zudem wird die Gefahr des Beulens durch die guten Stabilitätseigenschaften der Polycarbonat-Kernschicht erheblich reduziert. Ferner lässt sich durch Anpassung der Kernhöhe genügend Raum zur Anordnung von Fügetechniken aktivieren. Die Platten ermöglichen also eine weitgehend gewichtsneutrale Anpassung der Elementproportionen an die statisch-konstruktiven Erfordernisse. Für Außenanwendungen stellt die kraftschlüssige und gleichzeitig wasserdichte Ausführung der Falten aber vor allem im Bereich von Kehlen eine Herausforderung dar.

- Einsatz als flächige Ausfachung:

3D-Wabenplatten können zur Aussteifung einlagiger räumlicher Stabwerke wie Tonnen, Schalen oder Kuppeln eingesetzt werden. Die statische Beanspruchung beschränkt sich in diesem Fall auf Abscheren in Plattenebene sowie auf Biegung infolge Eigengewicht. Bei Außenanwendung wird zudem die Biegesteifigkeit quer zur Platte infolge Wind- und Schneelasten aktiviert. Dient die Platte nur als Füllelement, beschränkt sich die Fügetechnik auf die kraftschlüssige Anbindung der Plattenränder an das stabwerksförmige Haupttragwerk.

- Einsatz als Tragelement in ab- / unterspannten Dachkonstruktionen (Bild 5.16):

Hier dient die 3D-Wabenplatte als freitragendes Konstruktionselement und gleichzeitig als hüllende Schicht. Eine Projekt-Studie prüft exemplarisch eine seilunterspannte Atrium-Überdachung mit 5° Neigung und annähernd quadratischen Feldern (1,6 x 1,5 m). Die 40 mm dicken 3D-Wabenplatten haben Glasdeckschichten, die in ihren vier Ecken jeweils punktförmig durch Klemmbeschläge fixiert sind. Diese werden durch „Spider“ auf einer orthogonalen Seilnetzkonstruktion gehalten. Die gewählte Lösung ermöglicht größere Spannweiten und durch das reduzierte Flächengewicht bietet diese gegenüber den Glasscheiben einen geringeren Aufwand an Unterspannung. Die Platte ermöglicht gleichzeitig die Nutzung von bauphysikalischen Eigenschaften wie Wärmedämmung, Tageslichtbeleuchtung oder Blendschutz. Die Fügetechnik greift auf bewährte Methoden des Glasbaus zurück. Die Fugen zwischen den Platten müßten mit einem geeigneten, thermisch-trennenden Fugenprofil ausgefüllt werden, das die Dichtigkeit von der Oberseite her ge-

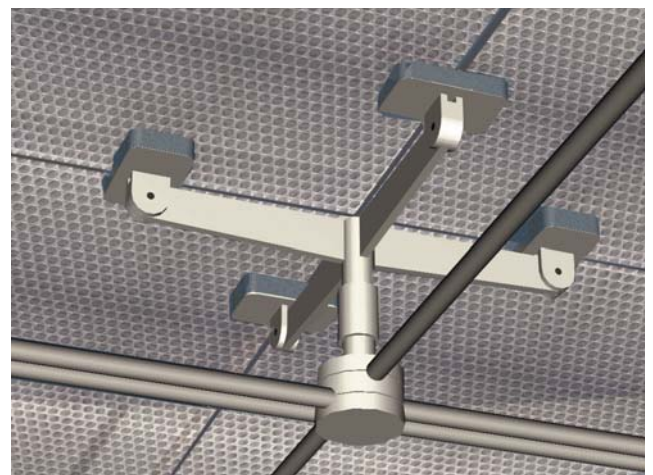


Bild 5.15: Detail-Studie zu einer unterspannten Dachkonstruktion, 3D-Wabenplatten mit Glas-/Glas+PC-Deckschichten

währleistet. Die Platten widerstehen aufgrund ihres guten Biegetragverhaltens Schneelasten, ihre Resttragfähigkeit ermöglicht ggf. sogar eine eingeschränkte Begehrbarkeit. Fraglich erscheint die statische Beanspruchbarkeit der Platte in den punktuellen Klemmzonen. Aufgrund der zu erwartenden Lastkonzentration ist hier mit Spannungsspitzen zu rechnen, die zum Versagen der dünnen Deckschichten in diesen Bereichen führen könnten. Das gezeigte Prinzip lässt sich grundsetzlich auch als Seilnetz-fassade in der Vertikalen denken, dann kämen den Fugen zwischen den Platten auch tragende Funktion zu, da die Platten ihr Eigengewicht übereinanderstehend abtragen müssten. Bei den 3D-Wabenplatten mit Gesamtstärken von 80-100 mm ließe sich das Seilnetz eventuell sogar in der Kernzone anordnen. Der Kern müsste an den Plattenrändern entsprechend perforiert werden.

Die Verwendung von 3D-Wabenplatten als tragende Konstruktionselemente bietet die Möglichkeit, weitgehend gewichtsneutral auf die unterschiedlichen statischen Anforderungen an eine Tragstruktur zu reagieren. Die Beulgefahr der Platten oder Spannungsüberschreitungen in deren Deckschichten ließen sich durch größere Kerndicken ohne Gewichtssteigerung kompensieren, da der Wabenkern in unterschiedlichen Stärken gleiche Flächengewichte aufweist. Auch die Kombination von Deckschichten verschiedener Materialität und Stärke im Sandwichelement ist möglich, um die Platten auf die örtliche Belastungsart und innere Spannungsverteilung in der Tragstruktur anzupassen. So ließe sich zum Beispiel in einem biegebeanspruchten Konstruktionselement Glas auf der druckbeanspruchten Seite sehr effektiv einsetzen und GFK oder vorgespanntes Glas auf der biegezugbeanspruchten Seite. Die Verwendung unterschiedlicher Sandwichkonfigurationen im Tragwerk ist jedoch mit einem erhöhten Herstellungs- und Planungsaufwand verbunden, der zudem bei der Montage eine entsprechende Logistik erfordert.



Bild 5.16: Detail-Studie zu einer seilunterspannten Dachkonstruktion, 3D-Wabenplatten mit Glas-/Glas+PC-Deckschichten als ebene Hüllfläche

5.2 Strategien des Fügens

Die Verwendung der 3D-Wabenplatte als Konstruktionselement macht eine elementgerechte Verbindungstechnik notwendig. Aufgrund des gezeigten statisch-konstruktiven Potentials des Plattentyps stehen vor allem Anwendungen mit Tragwerksrelevanz im Mittelpunkt. Ziel der folgenden Ausführungen soll sein, grundlegende Strategien des Fügens für die 3D-Wabenplatte zu definieren. Dabei stellt sich zunächst die Frage, welche konstruktiven Rahmenbedingungen der geschichtete, lichtdurchlässige Aufbau des Sandwichverbundes an Fügetechniken stellt und welche statischen und baukonstruktiven Anforderungen die jeweiligen Verbindungstechniken zu erfüllen vermögen. Daraus lassen sich erste Aussagen zur Eignung und Anwendungspotentialen ableiten. In Modellstudien werden ausgewählte Fügetechniken ausprobiert und auf ihre Praktikabilität, gerade in Hinblick auf tragende Anwendungen, untersucht.

5.2.1 Rahmenbedingungen und Anforderungen

Die Elementgrößen der 3D-Wabenplatte werden durch die Maximalabmessungen der Verbundkomponenten bestimmt. Die Abmessungen des 3D-Wabenkerns aus Polycarbonat richten sich wie in Kapitel 4.1 gezeigt nach den Werkzeuggrößen im thermopneumatischen Herstellungsprozeß. Kernstöße im Verbund führen nicht zur Schwächung des Tragverhaltens, da bei statischer Beanspruchung der Querkrafttransport durch die Stoßfuge nicht eingeschränkt wird. Aus gestalterischer Sicht sollten die Schnittkanten benachbarter Kernabschnitte in ihrer Lage genau aufeinander abgestimmt werden, um die Struktur durchlaufend erscheinen zu lassen (Bild 5.17). Das Stoßen der Deckschichten führt jedoch zur Aufhebung des Sandwicheffektes, da der flächige Normalkrafttransport durch die Fuge unterbrochen wird (insbesondere bei Zugbeanspruchung, Bild 5.18). Folglich bestimmt die verfügbare Plattengröße des Deckschichtwerkstoffs die Elementgröße der 3D-Wabenplatte. Bei Verwendung von Kunststoffen in der Deckschichtlage kann die Platte auch nach Verklebung spanend bearbeitet und den Bedürfnissen der jeweiligen Fügetechnik angepasst werden (z.B. Gehrungsschnitte, Bohrungen, etc.). Bei Verwendung von Glasdeckschichten müssen die Verbundkomponenten vor Verklebung bereits in ihre finale Form gebracht und für die jeweilige Fügetechnik „vorkonfektioniert“ werden. Dies stellt einen erhöhten Aufwand dar.

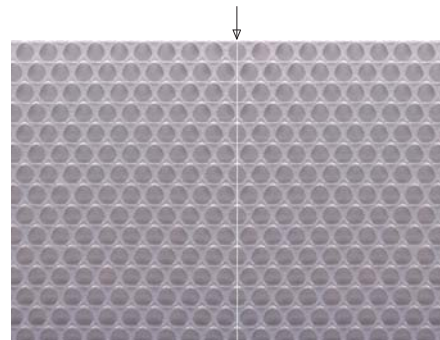


Bild 5.17: Durchlaufender Kernstoß

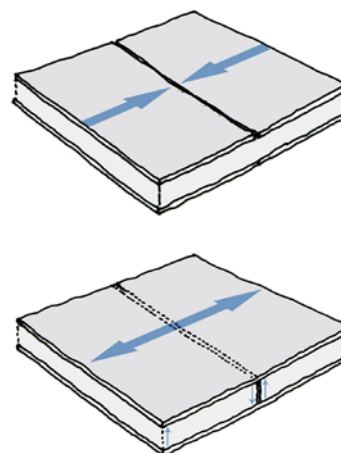
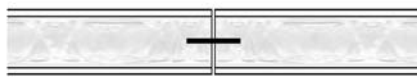
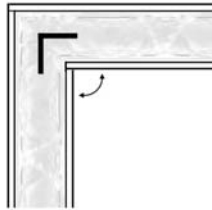
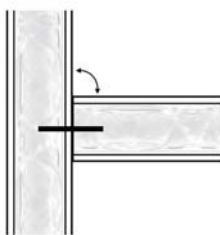


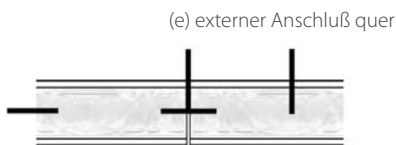
Bild 5.18: Stoßanordnung in 3D-Wabenplatten:
Deckschichtstoß unterbricht Kraftfluß (oben)
Kernschichtstoß beeinflusst Kraftfluß nicht (unten)



(a) Längsstoß

(b) Winkelstoß $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ 

(c) Flankenstoß (verschiedene Winkel)



(d) externer Anschluß längs

(e) externer Anschluß quer

Bild 5.19: Grundanordnungen möglicher Anschlussgeometrien von 3D-Wabenplatten

5.2.1.1 Fügeprinzipien für Platten und Scheiben

Das Fügen von Platten und Scheiben erfolgt meist im Bereich der umlaufenden Stirnseiten. Je nach Anforderung lassen sich die Platten in diesem Bereich linear oder punktuell fügen. Zu unterscheiden sind kraftschlüssige Verbindungen unter den Konstruktionselementen selbst und Verbindungen zwischen den Konstruktionselementen und externen Bauteilen. Hierzu zählen auch bauseitige Anschlüsse. Folgende geometrische Grundanordnungen zueinander bzw. zu externen Bauteilen werden untersucht (Bild 5.19):

Untereinander:

- a) Längsstoß („I-förmig“)
- b) Winkelstoß („L-förmig“)
- c) Flankenstoß („T-förmig“)

Extern:

- d) bauseitiger Anschluß längs zur Plattenebene
- e) bauseitiger Anschluß quer (geneigt) zur Plattenebene

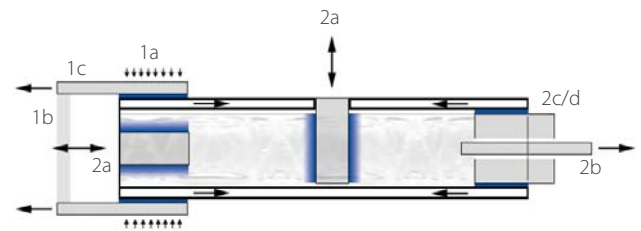
5.2.1.2 Anforderungen an die Fügechnik

Der Fügechnik kommt je nach Anwendung ein breites Spektrum an Aufgaben zu. Bei tragenden Strukturen entfaltet sich die Tragwirkung erst durch die kraftschlüssige und verformungsarme Fügung der scheibenförmigen Tragelemente. Gegebenenfalls müssen die Anschlüsse biegesteif sein oder die Scheiben bedürfen nur einer punktuellen Lagesicherung. Aus bauphysikalischer Sicht können bei Gebäudehüllen vor allem Aspekte wie Dichtigkeit, Wärmedämmung und Dauerhaftigkeit eine Rolle spielen. Besondere Bedeutung kommt der Fügechnik in gestalterischer Sicht zu, da die Fügung aufgrund der Lichtdurchlässigkeit der 3D-Wabenplatte in allen Schichtebenen wahrnehmbar wird. Die Fügechnik spielt daher als Gliederungselement der Gesamtkonstruktion eine wesentliche Rolle. Sie diktiert in ihrer tektonischen Ausformung die Betonung von Fuge oder Fläche.

5.2.1.3 Anforderungen der 3D-Wabenplatte

Bild 5.20 zeigt schematisch die konstruktiven Anknüpfungspunkte an das transluzente Sandwichgefüge. Wesentlich für eine funktionierende Verbindungstechnik ist die kraftschlüssige Weitergabe der in den Schichtkomponenten wirkenden Schnittkräften. Aus der Grafik wird deutlich, dass die Weitergabe von Normalkräften der

Deckschichtlage an das Fügebauteil möglichst in dessen Wirkungslinie bzw. -fläche erfolgen sollte. Die Kraftübertragung kann entweder auf der Außenseite der Deckschicht durch Reibschluß (1a) oder durch Schubverbund der Deckschichten durch Überlappung der Fügebauteile (1b,1c) erfolgen. Auf den stirnseitigen Direktkontakt der Deckschichten benachbarter Konstruktionselemente sollte verzichtet werden, um Spannungsspitzen in den geringen Deckschichtquerschnitten zu vermeiden. Die Füge Techniken sollten keine Zugbeanspruchungen quer zu den Deckschichten verursachen, um ein Abschälen der Deckschichten zu verhindern. Die Übertragung von Biegemomenten im Sinne eines biegesteifen Anschlusses sollte daher vollständig durch das Fügebauteil übernommen werden können. Im Gegensatz zu monolithischen Plattenwerkstoffen bietet sich besonders der durch die transluzente Kernschicht aufgespannte Zwischenraum zur Positionierung von Fügebauteilen an. So lassen sich in den Kernwaben Beschläge (2a) oder an den Stirnseiten Steckelemente (2b) und Füllkörper (2c/d) anordnen. Füge Techniken dieser Art werden in der Folge als integrierte Füge Techniken, deren Anordnung an den Deckschichtaußenseiten als additive Füge Techniken bezeichnet.



„Additiv“

- 1a: Außenseitig durch Klemmung quer (beidseitig)
- 1b: Außenseitig durch Umgreifung
- 1c: Außenseitig durch Verblattung (ein-/beidseitig)

„Integriert“

- 2a: In der Kernzone durch Implementierung von Beschlägen
- 2b: In der Kernzone durch Steckelement
- 2c/d: In der Kernzone durch Füllkörper/füllendes Randprofil

(blau: Kraft-Übertragungszonen)

Bild 5.20: Schematische Übersicht der konstruktiven Anknüpfungspunkte an die 3D-Wabenplatte

5.2.2 Additive Füge Techniken

Die additiven Füge Techniken sorgen für einen kraftschlüssigen Verbund über die Deckschichtaußenseiten. Die Fügebauteile sitzen überlappend vor den Deckschichten und bestimmen dadurch die Außenkontur der Fläche. Ein montage technischer Vorteil besteht darin, dass die Platten zur Fügung nicht gesondert bearbeitet werden müssen. Je nach Anwendungszweck und Gestaltungsziel können Stahl- oder Aluminiumprofile aber auch transparente Profile aus PMMA oder PC zur Anwendung kommen.

5.2.2.1 Klemmung (1a)

Die Klemmung stellt eine einfach herzustellende Füge Technik dar, deren Prinzip aus dem Fassadenbau bekannt ist. Wie Bild 5.21 zeigt, ist diese Füge Technik ausschließlich für Längsstöße zwischen 3D-Wabenplatten sowie für bauseitige Anschlüsse quer zur Platte, zum Beispiel zur Anbindung an Unterkonstruktionen einsetzbar. Für 3D-Wabenplatten lassen sich prinzipiell konventionelle Klemmleisten- und Punkthaltesysteme für alle Deckschichtvarianten und Kernhöhen anwenden. Dieses Fügeprinzip fand, wie in Kapitel 2.3.1 gezeigt, bei dem Pro-

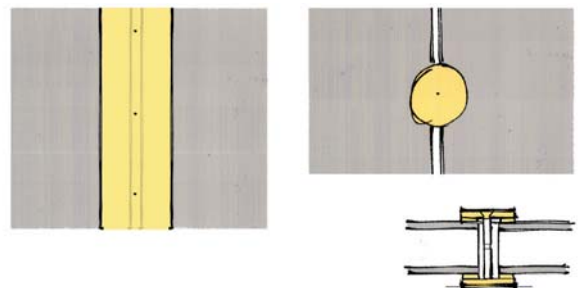


Bild 5.21: Additiv - Klemmung
linear (links), punkthafte (rechts oben)



Bild 5.22: Anwendung konventioneller Klemmsysteme mit Stahl- und Holzleisten in Hagendorn (vgl. Kapitel 2.3.1)

jekt „Fensterfabrik Hagendorn“ Anwendung (Bild 5.22). Lineare Systeme eignen sich für Warmfassaden, da sich durch die beidseitige Anordnung der Klemmleisten zwei Dichtungsebenen herstellen lassen. Bei punktwiser Klemmung im Außenbereich wird ein umlaufender Kantenverschluss sowie ggf. eine Abdichtung der Fuge zwischen den Platten erforderlich (vgl. Dachstudie S.162f.). Problematisch kann ein zu hoher Klemmdruck bei großen Kernhöhen werden. Die Tendenz von Thermoplasten unter Dauerbelastung zu kriechen kann dazu führen, dass der Klemmdruck quer zur Kernschicht mit der Zeit abnimmt und sich durch Lockerung Undichtigkeiten einstellen. Die Begrenzung des zur Klemmung notwendigen Querdrucks beschränkt den Einsatz für tragende Anwendungen auf hybride Dach- oder Fassadenkonstruktionen, für klassische Fassadenanwendungen ist diese Variante aber sehr zweckmäßig.

5.2.2.2 Umgreifende Profile (1b)

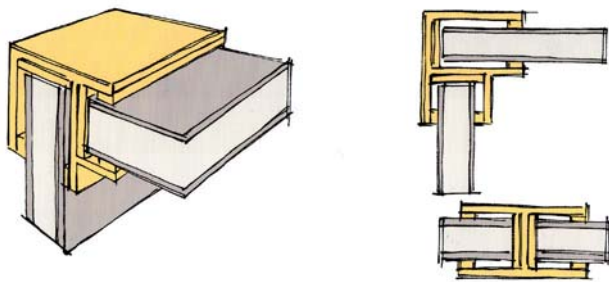


Bild 5.23: Additiv - Umgreifendes Profil
Profilgeometrien oder deren Kombinationen für L- und I-Stöße

Die Verbindung der Sandwichelemente durch umgreifende Profile stellt eine weitere Form der konventionellen Fügung von plattenförmigen Elementen dar (Bild 5.23) und kann zum Beispiel für Trennwände, tragende Geländer und Treppenstufen sowie Kaltfassaden oder Unterdecken eingesetzt werden. Im Vergleich zu Klemmsystemen erfolgt der Kraftschluss nicht durch Klemmdruck. Die Überlappung der Profilflansche mit den Deckschichten läßt einen schubfesten Verbund oder Formschluß durch die Umgreifung zu. Unterschiedliche Profilvariationen ermöglichen alle geometrischen Anschlusssituationen. Der für die Umgreifung notwendige Profilstieg kann eine Wärmebrücke bei gebäudehüllenden Anwendungen darstellen. Die Fügung erfolgt üblicherweise linear, auf einen stirnseitigen Kantenverschluss der Platten kann dann verzichtet werden. Das Fügeprinzip ermöglicht eine effektive Kraftübertragung der Deckschichtspannungen, was die Fügetechnik interessant für räumliche Flächentragwerke (vgl. Kapitel 5.1.4) macht. Je nach Werkstoffwahl muss der Verbund zwischen Profil und Deckschicht aber unterschiedlich erfolgen. So lassen sich Glasdeckschichten nur verkleben, polymere Deckschichten können auch verkeilt oder geschraubt werden. Eine punktuelle Verschraubung erzeugt jedoch Durchstoßpunkte und kann zu Spannungsspitzen in den Deckschichten führen. Bilden die Profile an sich das Primärtragwerk in Form eines räumlichen Stabwerks, so steifen die 3D-Wabenplatten nur aus, sind formschlüssig gehalten und brauchen in den Überlappungsfugen lediglich abgedichtet werden.

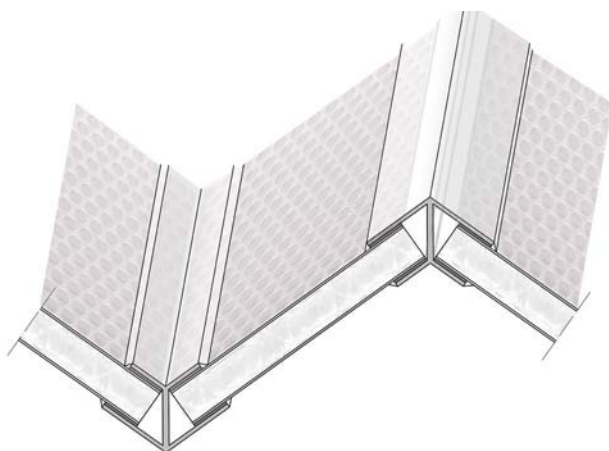


Bild 5.24: Anwendungsprinzip zur Ausbildung von Falten eines Flächentragwerks aus 3D-Wabenplatten: Verbindungsprofile z.B. aus PMMA (transluzent) oder Aluminium (opak), Abdichtung der Fugen zwischen Deckschicht und Profilflansch

5.2.2.3 Verblattung (1c)

Die Verblattung ähnelt prinzipiell den beiden vorherigen Fügeprinzipien. Sie stellt eine Füge Technik dar, bei der die Deckschichten benachbarter Platten durch lineare oder punktweise Überlappung eines anliegenden Fügebauteils kraftschlüssig miteinander verbunden werden (Bild 5.25). Zwischen den Fügebauteilen der jeweils gegenüberliegenden Seite besteht jedoch keine Verbindung. Die Fügung stellt eine einfache und übliche Lösung dar, bei der zum Beispiel mit L-Winkeln oder Laschen alle gängigen Anschlussgeometrien hergestellt werden können. Bild 5.26 zeigt einen Winkelstoß zweier Platten, die punktuell durch einen innenseitig angeordneten Eckverbinder in ihrer Lage fixiert sind. Durch beidseitige, lineare Anordnung kann auch eine gewisse Biegesteifigkeit erzeugt werden. Die punktuelle Verblattung macht die Füge Technik vor allem für selbsttragende Innenanwendungen wie im Objektbau oder Möbelbau interessant, dann aber nur mit GFK- oder PMMA/PC-Deckschichten. Hier kann eine wie im Bild gezeigte Kombination mit integrierter Beschlagstechnik in der Kernzone erfolgen.

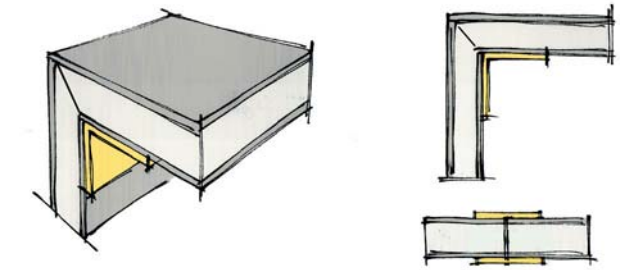


Bild 5.25: Additiv - Verblattung
Eckanschluss (einseitig)

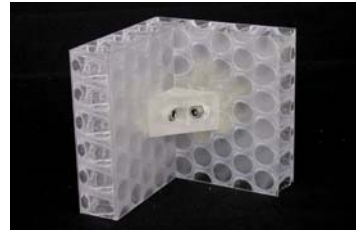


Bild 5.26: Modellstudie zu (1c): Winkelstoß zweier Platten mit punktueller Verblattung, Verschraubung in harzvergossenen „Rampa“-Muffen im Bereich der Kernschicht

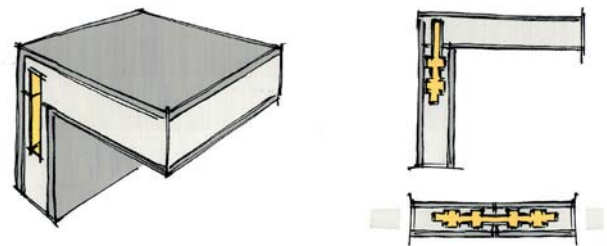


Bild 5.27: Integriert - Beschläge in der Kernzone (2a)



Bild 5.28: Anordnung von Muffen mit Innengewinde in Kernwaben, kraftschlüssiger Verbund durch Ausgießen mit transparentem Epoxidharz



Bild 5.29: Modellstudie zu (2a): Exzenterverbindung für einen Flankenstoß (siehe auch Kapitel 5.2.4)

5.2.3 Integrierte Füge Techniken

Die Anordnung von Verbindungselementen in der transluzenten Kernzone ermöglicht die Ausbildung ebenbündiger, durchgehender Außenoberflächen. Die Füge Techniken treten dadurch in ihrem Erscheinungsbild zurück und unterstützen den transluzenten Charakter der Gesamtkonstruktion. Es sind lösbare und unlösbare, lineare und punktweise Verbindungen denkbar. Der Zusatzaufwand an gewichtsträchtigen Elementen bleibt gering und entspricht damit auch einer leichtbaugerechten Verbindungstechnik. Die Implementierung von Fügebauteilen im Sinne einer integralen Bauweise erfordert aber eine „Vorkonfektionierung“ der Platten vor der endgültigen Montage, was grundsätzlich mit einem höheren Fertigungsaufwand verbunden ist. Durch Fügebauteile hervorgerufene, punktuelle Belastungen quer zur Plattebene sollten im Einbauzustand vermieden werden, um ein Abschälen der Deckschichten bzw. ein Ausreißen oder Eindrücken der Kernschicht zu verhindern.

5.2.3.1 Beschläge in der Kernzone (2a)

Die Waben der Kernschicht bieten sich zur Anordnung von Beschlagstechnik in Form von Gewindemuffen oder

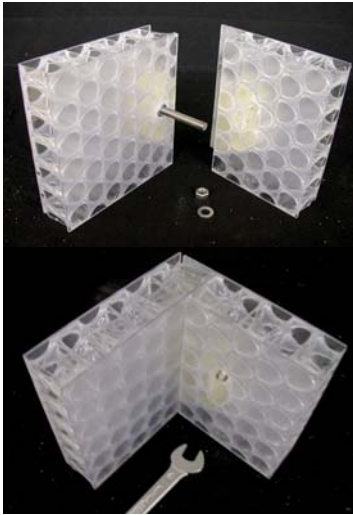


Bild 5.30: Modellstudie zu (2a) für eine Ecksituation: Verguss einer Muffe in der Kernschicht mit Epoxidharz. Seitliche Verschraubung mit Montageeingriff

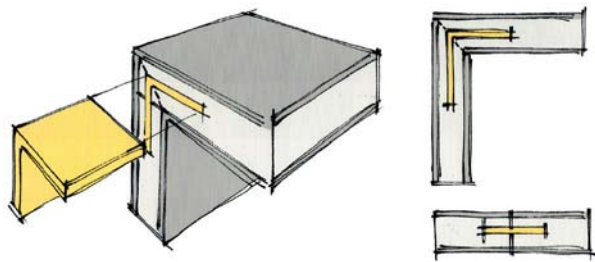


Bild 5.31: Integriert - Steckelement

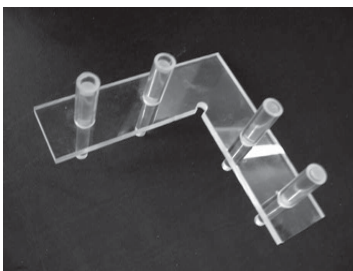


Bild 5.32: Modellstudie zu (2b): Verbindung von 4 Platten in einer Ecksituation mittels transparentem Steckelement aus PMMA

-stäben an. Der kraftschlüssige Verbund erfolgt durch Verguß der Wabe mit einem glasklaren und farblosen Harzsystem auf Epoxid- oder Polyesterbasis (Bild 5.28). Dessen Lichtdurchlässigkeit in Relation zur Platte ist aus gestalterischen Gründen vorher zu prüfen. Der Verbund kann noch verbessert werden, wenn die Beschlagsteile eine äußere Profilierung, zum Beispiel in Form eines Außengewindes aufweisen. Die Beschläge können entweder stirnseitig am Plattenrand oder auch quer zur Plattenebene angeordnet werden. Wichtig ist die saubere Trennung von den Deckschichten, um ein lokales Ausreißen oder Abschälen dieser zu vermeiden. Ein montage technisches Grundproblem besteht jedoch darin, dass sich die Beschläge zwar in der Kernzone befinden, diese aber nur von außen geschraubt werden können. Es sind daher zwangsweise Durchstoßpunkte durch die Deckschichten notwendig (Bild 5.30), was die Verwendbarkeit von Glasdeckschichten problematisch macht. Die Stoßfugen zwischen den Platten lassen sich durch das punktuelle Fügeprinzip nicht abdichten, deren Eignung ist daher auf Anwendungen ohne bauphysikalische Anforderungen beschränkt. Zugversuche bescheinigen der Vergußlösung grundsätzlich eine gute, wenn auch begrenzte Tragfähigkeit. Bild 5.29 zeigt eine Modellstudie mit Exzenterbeschlägen, die zu sehr reduzierten Lösungen führen kann, in der die Fügung kaum mehr wahrnehmbar erscheint. Der durch die Schraubung steuerbare Anpressdruck kann eine gewisse Biegesteifigkeit bei L- oder T-Stößen bewirken. Allgemein macht der punktweise Harzverguß die Herstellung vergleichsweise aufwendig, scheint aufgrund seines gestalterischen Mehrwerts aber besonders geeignet für den Objekt- und Möbelbau sowie den Messebau. Auch kleinere Scheibentragwerke sind denkbar, bei denen fügetechnisch nur eine Lagesicherung der 3D-Wabenplatten notwendig wird. Kapitel 5.2.4 zeigt in einer Projektstudie exemplarisch die Anwendung integrierter Beschlagstechnik für eine derartige Anwendung auf.

5.2.3.2 Steckelement in der Kernzone (2b)

Für die Fügung durch Stecken wird die federnde Eigenschaft der Kunststoffe ausgenutzt. Die einfachste Anwendung ist der Längsstoß (Bild 5.31, u.r.). Der polymere Wabenkern benachbarter Platten wird längsseitig mit einer Nut versehen, in die ein leistenartiges Steckelement mit einem etwas größeren Querschnitt einbindet. Der resultierende Schlupf bewirkt die Kraftübertragung ausschließlich durch Reibschluß. Die Tragfähigkeit ist jedoch begrenzt, da keine Biegemomente übertragen werden

können und bei Zugbeanspruchungen der Auslösemechanismus in Gang gesetzt wird. Das Steckelement kann linear oder auch punktförmig angeordnet werden. Bild 5.33 zeigt eine Modellstudie, bei der vier Platten in einer Ecksituation durch ein entsprechend konzipiertes Steckelement aus PMMA miteinander verbunden werden. Die Winkelplatte (Bild 5.34) positioniert die Platten zueinander. Sie ist mit Vollstäben aus PMMA versehen, die in die Kernschicht nach oben genanntem Prinzip einbinden. Die Simulation eines Biegemomentes durch Querbelastung der Ecke in einem Winkel von 45° (Bild 5.34) zeigt das Vorhandensein einer gewissen Biegesteifigkeit. Das Versagen tritt durch Bruch der Winkelplatte ein, die Steckung im Kern bleibt weitgehend unversehrt. Da das transparente Steckelement im Verbund kaum wahrnehmbar ist, bleibt die Lichtdurchlässigkeit vollständig erhalten. Problematisch ist jedoch die Tatsache, dass die Deckschichten stirnseitigen Kontakt erhalten, soweit kein umlaufender Kantenverschluss vorgesehen ist. Das Steckprinzip gewährleistet zudem keine Dichtigkeit, da die Fugen zwischen den Deckschichten offen bleiben. Die gezeigte Fügetechnik eignet sich daher vornehmlich für räumliche Strukturen des Objekt- und Messebaus. Da die Fügung ausschließlich in der Kernzone erfolgt, sind grundsätzlich alle Deckschichtvarianten denkbar. Die Verwendung von Steckelementen setzt eine genaue Planung des Montageablaufs und eine hohe Genauigkeit in der Ausführung voraus.

5.2.3.3 Füllkörper in der Kernzone (2c)

Ein weiteres Fügeprinzip stellt die Anordnung eines randständigen Füllkörpers im Sandwichgefüge dar (Bild 5.35). Dieser kann zum Erhalt des transluzenten Charakters ebenfalls aus PMMA oder PC bestehen und füllt dabei die gesamte Höhe der Kernschicht aus. Der schubfeste Verbund zwischen den Deckschichtinnenseiten erfolgt durch flächige Klebung oder Schraubung (nur bei polymeren Deckschichten). Die Stirnseite des Füllkörpers kann zur Aufnahme von Schrauben oder Beschlägen zur Anbindung an externe Bauteile herangezogen werden. Die Füllkörper lassen sich auch als Verbindungselemente zwischen zwei Platten verwenden. Gerade im Bereich von Winkelstößen kann ein L-förmiger Füllkörper zur Erhöhung der Steifigkeit beitragen. Die Verbindungen sind jedoch starr und nicht mehr lösbar. Bild 5.36 zeigt Modellstudien eines Winkel- und Längsstosses mit 40 mm dicken 3D-Wabenplatten und punktförmigen Füllkörpern aus Acrylglas. Solche Verbindungen sind jedoch nur als Baustellennähte

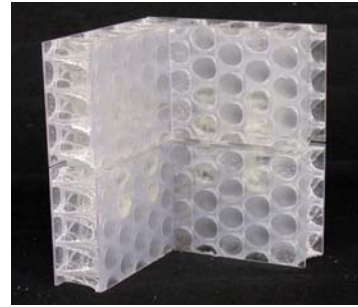


Bild 5.33: Modellstudie zu (2b) - Zusammengesteckte Konstruktion

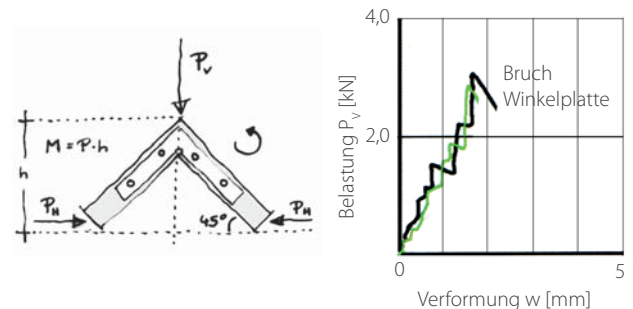


Bild 5.34: Belastungsversuch zu (2b): Simulation eines Eckmoments M gemäß Anordnung (links), Last-Verformungsdiagramm (rechts) Meßdatenaufzeichnung gemäß Kapitel 3.3 (S.78ff.)

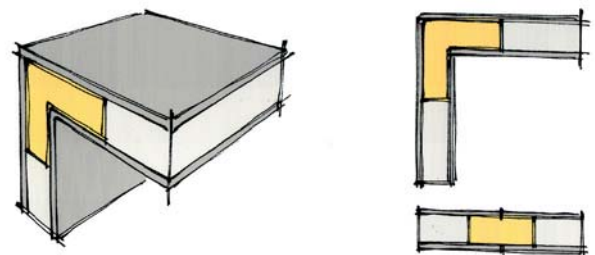


Bild 5.35: Integriert - Steckelement

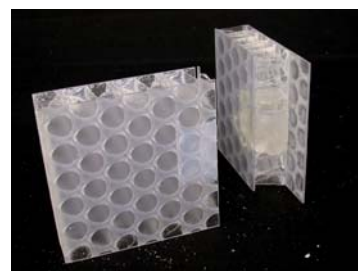


Bild 5.36: Integriert - Steckelement

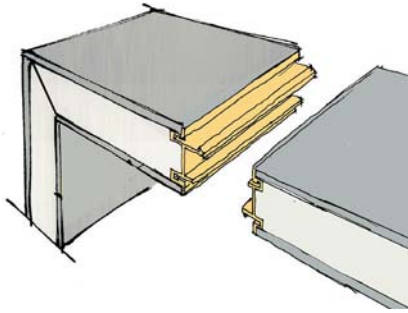


Bild 5.37: Integriert - Randprofil mit Nut- und Federverbindung

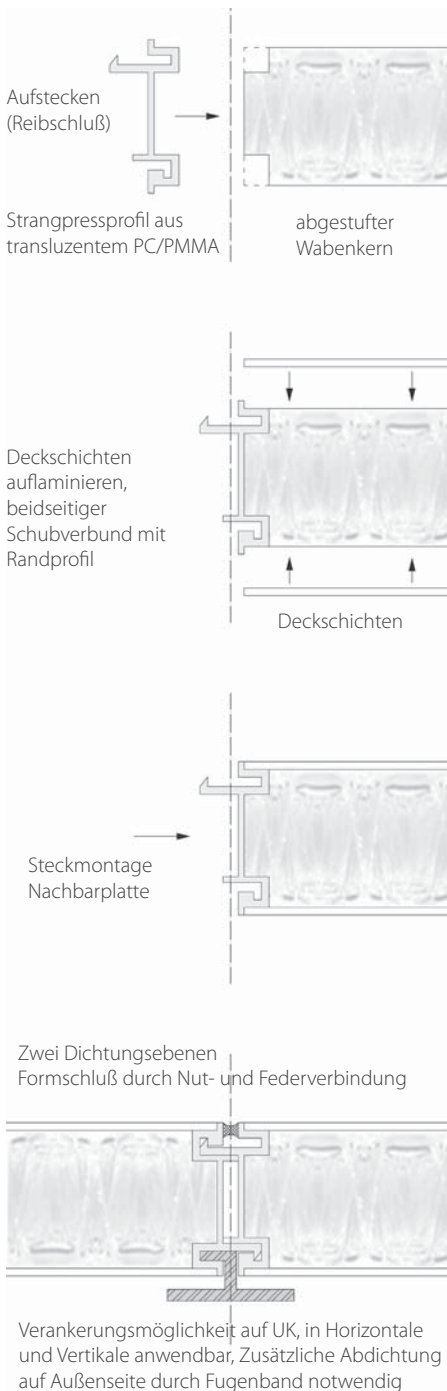


Bild 5.38: Studie zu einer transluzenten Nut- und Federverbindung für die 3D-Wabenplatte - Herstellungs- und Montagekonzept

ausführbar. Die Verklebung der Füllkörper kann erst bei Montage erfolgen. Dazu muß die Kernschicht über die gesamte Höhe ausgefräst werden. Das freie Überstehen der Deckschichten stellt einen sehr ungünstigen Montagezustand dar, da die Deckschichten dann besonders abschälgefährdet sind und die Schichtfuge leicht aufreißen kann. Aus gestalterischer Sicht ist zu bemerken, dass die Füllkörper in der Fläche sichtbar werden und die Optik der Kernstruktur unterbrechen. Dies kann den Gesamteindruck stören, kann aber auch ein gestalterisches Thema sein. Zur ausreichenden Dichtigkeit der Fügepunkte bedarf es einer zusätzlichen Abdichtung der Klebefuge zwischen Füllkörper und Deckschichtinnenseite. Der massive Füllkörper kann zudem eine Wärmebrücke darstellen, was die Verwendung im Außenbereich eingeschränkt. Der massive Füllkörper kann aber auch einfach nur als Konterstück zur Erhöhung der Quersteifigkeit bei Klemmverbindungen dienen. Grundsätzlich ergeben sich verschiedene Anwendungsfelder im Innen- und Außenbereich, die gezeigte Montageproblematik macht die großflächige Anwendung dieser Fügetechnik aber schwierig.

5.2.3.4 Randprofil in der Kernzone (2d)

Als weiteres Fügetechnik in der Kernzone bietet sich die Erweiterung des stirnseitigen Kantenverschlusses zu einem Randprofil mit Nut- und Federtechnik an. Entsprechende Lösungen zur linearen, kraftschlüssigen Fügung sind von polymeren Stegplatten bekannt (vgl. Kapitel 2.2.2). Für die 3D-Wabenplatte müsste ein gesondertes Randprofil aus transparentem PMMA/PC durch Strangpressung hergestellt werden, das ebenbündig die Kernschicht abschliesst und wie ein Füllkörper mit den Deckschichtinnenseiten schubfest verklebt wird. Das Fügeprinzip erfüllt so mehrere Anforderungen gleichzeitig: Das Profil bewirkt die Erhaltung der Wabenoptik bis unmittelbar in die Randzone, der Verbund durch das Nut-und Federprinzip bewirkt eine einwandfreie Abdichtung in zwei Ebenen mit thermischer Trennung. Die Verbindung erlaubt zudem die Aufnahme von Zwängungsspannungen. Das Fügeprinzip ist mit allen Deckschichtwerkstoffen denkbar. Das Randprofil müsste bereits bei der Herstellung der Sandwichelemente mitintegriert werden. Einen möglichen Herstell- und Montageablauf stellt Bild 5.38 dar. Das gezeigte Fügeprinzip erfordert zwar einen erhöhten Produktionsaufwand bei der Plattenherstellung, ermöglicht aber vor allem einen großflächigen Einsatz für Fassaden und gebäudehüllende Anwendungen bei gleichzeitiger Wahrung des transluzenten Charakters in der Fläche.

5.2.4 Projektstudie

Das Projekt „Living Box“ entstand im Rahmen eines Praxisseminars am Fachgebiet Tragwerksentwurf und Konstruktionen der Technischen Universität Kaiserslautern im Dezember 2005. Ziel war die Entwicklung eines Experimentalbaus für die Design-Messe „Passagen 2006“ in Köln, um Ansätze des erweiterten konstruktiven Einsatzes polymerer Sandwiche auszuprobieren und aufzuzeigen. Die Konstruktion sollte als Ausstellungspavillon für weitere Events dieser Art wieder zu verwenden sein. Auf Grundlage der vorausgegangenen Untersuchungen und Modellstudien war die Zielsetzung klar vorgegeben, die transluzente 3D-Wabenplatte tragend und mit integrierter Fügechnik anzuwenden.

5.2.4.1 Konzeption

Das Konzept basiert auf der Forderung nach Präsentation der transluzenten 3D-Wabenplatte als integrales Konstruktionselement für räumliche Strukturen. Der Entwurf sieht die Schaffung eines begehbaren Raumes vor, der es ermöglichen soll, das Material in liegender, stehender, freispannender und auskragender Position zu erfahren. Dabei galt es, das festgestellte statisch-konstruktive Potential der Platte zu nutzen und das Zusammenspiel von Transluzenz, Plattenstruktur und Fügechnik zu analysieren. Zudem wurde die Eignung der 3D-Wabenplatte hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Montage untersucht. Konzeptionelle Vorgaben waren der Verzicht auf eine Unterkonstruktion, der minimierte Einsatz von Verbindungselementen sowie die leichte und schnelle Demontierbarkeit der Struktur. Das herstellbedingte Plattenformat von 2x1 Meter bestimmte das Konstruktions- und Ausbauraster von 96 x 96 cm. Um die Kernzone als Raum für Fügechnik nutzen zu können und eine „Vorkonfektionierung“ der Elemente zu ermöglichen, wurden 40 mm starke 3D-Wabenplatten mit 2 mm dicken Polycarbonatdeckschichten verwendet. Die Konstruktionselemente bildeten ein räumliches Scheibentragwerk und steiften sich so gegeneinander aus. Die Elemente waren so angeordnet, dass sich verschiedene Lagerungsfälle einstellen konnten (ein-, zwei-, dreiseitig gehalten, auskragend). Durch Aussparung und Umklappung von definierten Plattenabschnitten ergaben sich für die Besucher nutzbare Zonen wie Ablage- und Sitzbereiche.

5.2.4.2 Konstruktionsprinzip



Bild 5.39: Gesamtansicht des Experimentalbaus auf der „Passagen 2006“ auf dem Vulkangelände in Köln

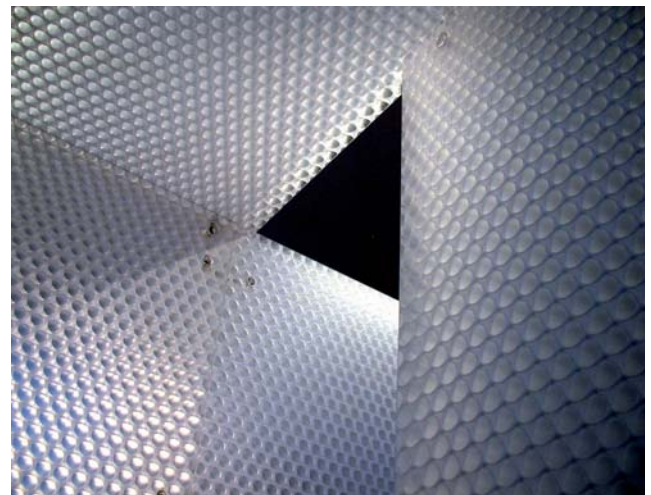


Bild 5.40: Orthogonale Anordnung von Scheiben- und Deckenelementen zu einem Scheibentragwerk

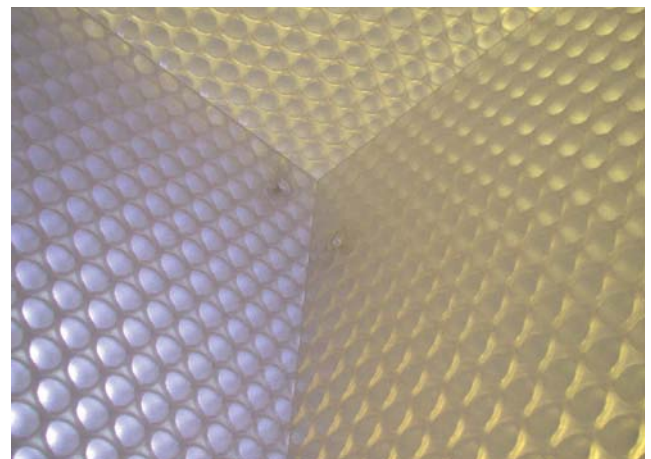


Bild 5.41: Innenecke mit integrierter Fügechnik
Lichteffekt durch Überlagerung von Tages- und Kunstlicht



Bild 5.42: Verwendete Beschläge: Rampa-Muffe mit Außen- und Innengewinde, Exzenter-schraube und Exzenter-scheibe

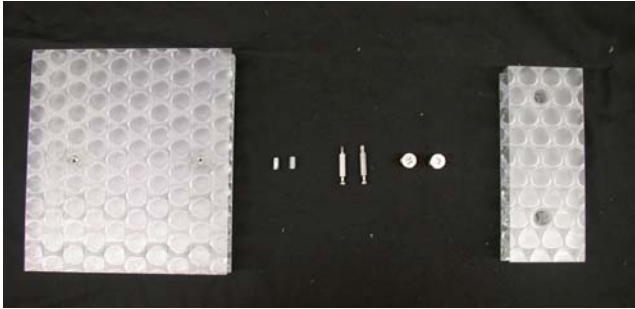


Bild 5.43: Modellstudie Flankenstoß: Konvektionierte Bauteile und Beschläge

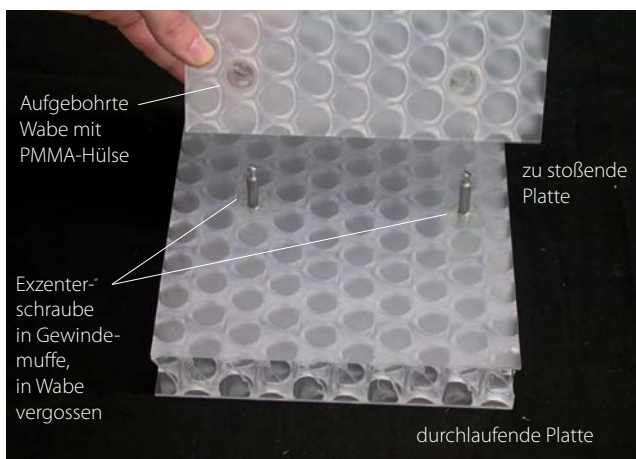


Bild 5.44: Modellstudie Flankenstoß: Aufschieben des stumpf gestossenen Bauteils auf die in den Rampamuffen verschraubten Exzenter-stäbe

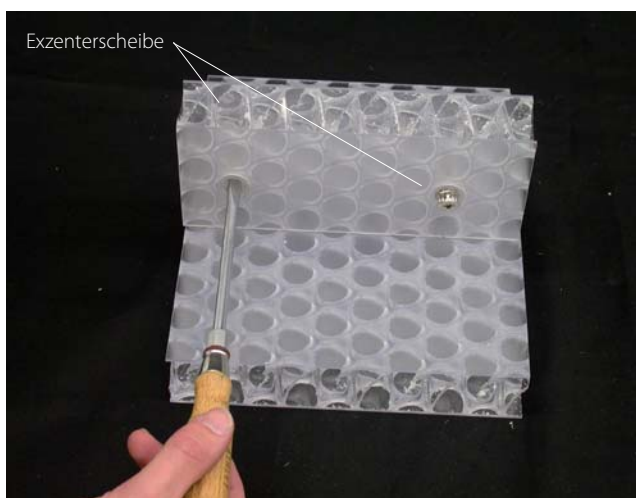


Bild 5.45: Modellstudie Flankenstoß: Verankerung und Festziehen der Exzenter-scheiben in den Waben

Die Tragwirkung der Raumstruktur resultierte aus der stabilisierenden Anordnung der freitragenden Elemente zueinander und reduzierte so das Anforderungsprofil der Fügetechnik auf reine Lagesicherung. Sie sollte in der Lage sein, die Platten oberflächenbündig zu koppeln, ein Aufklaffen der Stossfugen bei temporären dynamischen Beanspruchungen zu verhindern und im Rahmen der Wiederverwendbarkeit eine einfache (De-)Montierbarkeit zu ermöglichen. Die versetzte und orthogonale Anordnung der ebenen Platten zueinander beschränkte die räumlichen Anschlussgeometrien auf rechtwinklige Längs-, Winkel- und Flankenstöße, was zu einer weiteren Reduzierung und Vereinheitlichung des Anschlussprinzips führte.

5.2.4.3 Fügetechnik

Die kraftschlüssige Fügung wurden als lösbare Exzenter-Schraubverbindung in der Kernzone konzipiert. Diese Verbindungstechnik ist aus dem konventionellen Möbelbau bekannt und ermöglichte eine „verdeckte“ Ausbildung der Fügung von plattenförmigen Elementen. Die Anwendung des Prinzips auf das Sandwichgefüge der 3D-Wabenplatte zeigt eine vorangegangene Modellstudie in Bild 5.42 - 5.45. In der durchlaufenden Platte wurden seitlich Exzenter-schrauben mit Spannkopf gesetzt (Bild 5.44). Die Exzenter-schrauben wurden in eine Gewindemuffe eingedreht, die oberflächenbündig in einer aufgebohrten Wabe mit transparenten Epoxidharz vergossen wurde. Die spanende Bearbeitbarkeit von Polycarbonat erlaubte die seitliche Bohrlochsetzung durch die Deckschichtlage. Die zu stoßende Platte wurde ebenfalls seitlich aufgebohrt, die Bohrungen endeten jeweils kurz vor der gegenüberliegenden Deckschicht. Der Bohrdurchmesser ist auf die Exzenter-scheibe ausgerichtet. Diese Bohrungen wurden mit einem kurzen Hülsestück aus transparentem PMMA oder Aluminium ausgefüllt ($t=2\text{mm}$). Die Hülse diente als Positionierhilfe und zur flächigen Kraftübertragung auf das Sandwichgefüge. Sie ergänzt zudem die fehlenden Wabenwandungen und gleicht die punktuelle Schwächung des Wabenkerns weitgehend aus. Eine stirnseitige Bohrung in der Mittelebene des Kerns und durch die Mantelfläche der Hülse ermöglicht das Einschieben der Exzenter-schraube. Das Eindrehen der Exzenter-scheibe in den Spannkopf der Schraube bewirkt eine zentrische Pressung der zu stoßenden Platte mit seinen Deckschichten auf die durchlaufende Platte (Bild 5.45). Durch die Federwirkung des Polycarbonats entsteht eine wenn auch geringe Vorspannung, die exzentrische Beanspruchungen ausgleicht

und eine weitgehend homogene Kraftübertragung über die jeweilige Stoßlänge gewährleistet.

5.2.4.4 Gestalterische Aspekte

Wie Bild 5.38 und 5.39 zeigen, nimmt sich die in der Kernzone angeordnete Fügetechnik sehr zurück und lässt die ornamental anmutende Struktur der transluzenten 3D-Wabenplatte voll zur Geltung kommen. Die punktwise wahrnehmbaren Exzenterbeschläge schimmern je nach Lichteinfall und Blickwinkel mehr oder weniger stark durch (Bild 5.46 / 5.47). Zur Erzielung dieses Effekts ist eine hohe Genauigkeit bei der geometrischen Positionierung der Verbindungselemente erforderlich. Das triangulierte Raster des Wabenkerns gibt den Rahmen zur bewussten Ausrichtung der in das Sandwich einbindenden Beschlagsmittel vor. Sowohl konstruktiv als auch gestalterisch ist es sinnvoll, Muffe und Exzenter Scheibe jeweils zentriert in die Wabe zu setzen. Eine Missachtung der Kerngeometrie hätte die Harzverfüllung von bis zu vier Waben notwendig gemacht, was einen vermehrten Materialverbrauch und eine unnötige Vergrößerung des Fügepunktes bewirkt hätte. Dieser gestalterische Mehrwert erfordert jedoch einen erhöhten planerischen und herstellungstechnischen Aufwand vor der Montage, wie bei Realisierung des Experimentalbaus deutlich wurde.

5.2.4.5 Montage

Die zugeschnittenen Platten wurden vor Montage mit der beschriebenen Fügetechnik versehen. Die Fixierung der horizontalen Bodenplatten erfolgt auf Montagefüßen. Die Wandscheiben werden per Exzenterverbindung auf die Sockelplatten aufgesetzt. Die Vorgabe, dass jeweils zwei Platten gestoßen bzw. miteinander verbunden werden, bestimmt das Verlegeraster des Bodens und die Anordnung der Platten. Die Wände werden mit dem Boden zunächst fixiert, in einem zweiten Arbeitsgang erfolgt die oberflächenbündige Ausrichtung und Fixierung der Wandscheiben. Das quadratische Deckenfeld wird zum Schluss aufgesetzt. Der 30 m² große Pavillon konnte innerhalb von eineinhalb Stunden durch zwei Monteure unter Zuhilfenahme eines Schraubenziehers in Köln aufgebaut werden. Die Demontage erfolgte durch einfaches Lösen der Exzenterverbindungen. Bei Begutachtung der Plattenstirnseiten fielen keine plastischen Verformungen oder Schäden im Sandwichverbund auf. Der Pavillon konnte ein weiteres Mal an anderer Stelle aufgebaut und erneut für Ausstellungszwecke verwendet werden.



Bild 5.46: Illumination mit farbigem Kunstlicht



Bild 5.47: Anordnung von selbsttragenden Scheiben- und Deckenelementen

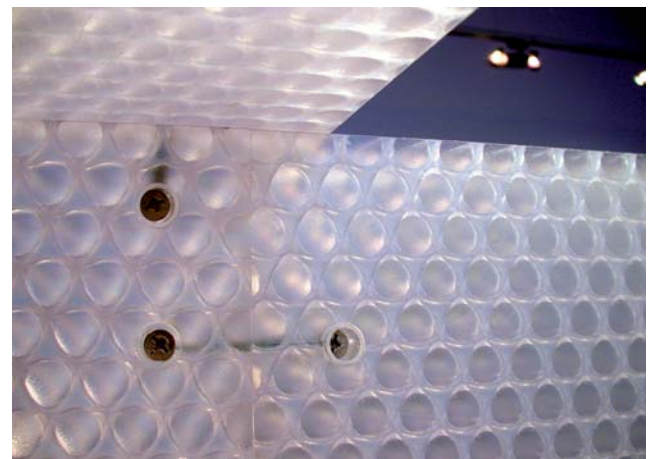


Bild 5.48: Anschluss-Situationen: Scheibenlängsstoß (unten) und Winkelstoß Decke/Wand (oben)

5.3 Ergebnisse

Wie gezeigt wurde, sind die konstruktiven Einsatzmöglichkeiten der 3D-Wabenplatte grundsätzlich breit gefächert, deren Eignung für die in Kapitel 5.1 aufgeführten Anwendungsfelder aber vor allem vom jeweiligen Deckschichtwerkstoff und der Schichtdickenverteilung abhängig. Aus den durchgeführten Studien und Untersuchungen sind folgende Schlüsse für die konstruktive Eignung der 3D-Wabenplatte zu ziehen:

3D-Wabenplatten mit Glasdeckschichten erweitern das Anwendungspotential gerade für tragende Anwendungen, da der Sandwicheffekt besser ausgenutzt werden kann und große Gewichtseinsparungen durch Reduzierung des Glasanteils gegenüber konventionellen Glasbaukonstruktionen möglich sind. Auch für Anwendungen im Außenraum, wo es auf Beständigkeit und Dichtigkeit ankommt, kann Glas in der Deckschichtlage eine bessere Alternative zu polymeren Werkstoffen sein.

Die Verwendung von Glas lässt jedoch nicht jede Fügetechnik zu. Die nachträgliche Bearbeitbarkeit der Platte zur Anordnung von Fügebauteilen ist stark eingeschränkt, da die dünnen Glasplatten nach Herstellung nicht gebohrt oder geschnitten werden können (vor allem vorgespannte Gläser). Zudem sind die Stirnkanten der Glasplatten sehr empfindlich für Spannungsrisse. Die Unversehrtheit der Deckschichten lässt sich daher am besten mit additiven Fügetechniken wie Klemmen oder Stecken gewährleisten.

Polymere Deckschichten aus GFK, Polycarbonat oder Acrylglas (PMMA) hingegen lassen aufgrund ihrer spanenden Bearbeitbarkeit auch Fügetechniken mit erhöhtem Vorkonfektionierungsgrad zu. Elemente dieser Deckschichtkonfiguration sind aber in ihrer Verwendbarkeit aufgrund begrenzter bauphysikalischer und statischer Leistungsmerkmale eingeschränkt.

Bei der Anwendung additiver Fügetechniken wird die 3D-Wabenplatte wie eine monolithische Vollplatte verwendet, was zum einem aus dem konventionellen Glas- und Fassadenbau gewohnten Gesamterscheinungsbild führt. Der Planungs- und Herstellungsaufwand ist trotz des erhöhten Materialeinsatzes an Fügebauteilen als geringer einzuschätzen als bei integrierten Fügetechniken. Unabhängig davon bestimmt die Kerndicke zunächst selbst deren Kompatibilität zu verschiedenen Fügetechniken. Integrierte Lösungen lassen sich für Gesamtdicken unter 30 mm Gesamtdicke nicht verwenden, da der Kernzwischenraum zu gering ist.

Die Modellstudien haben gezeigt, dass in der Anordnung von Fügetechniken innerhalb der Kernzone ein gewisser Reiz liegt, da die Flächen bündig durchlaufen können und der transluzente Charakter der Gesamtkonstruktion erhalten bleibt. Die Problematik der meisten integrierten Fügetechniken besteht jedoch, wie gezeigt, in einer nicht zu vermeidenden Undichtigkeit der Fuge. Zudem lassen sich bei tragenden Anwendungen die Normalkräfte in den Deckschichten nicht effektiv genug weiterleiten, was die Verwendung in Tragwerken ebenfalls einschränkt. Das Potential integrierter Fügetechnik besteht folglich in erster Linie in einem gestalterischen Mehrwert. Daher sind integrierte Fügetechniken, gerade in ihrer herstellungstechnischen Komplexität vornehmlich für Anwendungen des Innen- und Messebaus interessant, wo die Transluzenz der Sandwichplatte gezielt zur Inszenierung mit dem Medium Licht genutzt wird und statische sowie bauphysikalische Anforderungen eher zweitrangig sind.

Eine Ausnahme bildet in diesem Zusammenhang das in den Stirnseiten der Platte integrierbare Randprofil mit Nut- und Federverbindung (S.173). Es würde eine einwandfreie bauphysikalische Lösung bei gleichzeitiger Erhaltung des transluzenten Charakters gewährleisten und die Eignung der 3D-Wabenplatte für Anwendungen in der Gebäudehülle verbessern. Aufgrund der vergleichsweise einfachen Herstellungsweise als Strangpressprofil ließe sich diese Fügetechnik auch sehr wirtschaftlich mit unterschiedlichen Deckschichten einsetzen.

Für tragende Anwendungen stellt besonders das geringe Flächengewicht der 3D-Wabenplatte einen zentralen Vorteil dar. Zur Minimierung des Aufwandes an Fügetechniken sollte das Tragwerk am besten so ausgebildet werden, dass die Verbindungstechnik auf reine Lagesicherung reduziert werden kann. Hierzu sollten die Elemente linear gestoßen werden und sich gegenseitig aussteifen. Der Kraftschluss sollte über die Deckschichten hergestellt werden, um einen homogenen Kraftfluß zu gewährleisten. Das geringe Flächengewicht kann zudem einen hohen Transport- und Montagevorteil mit sich bringen, da die Platten je nach Größe ohne aufwendige Hebewerkzeuge und in kürzerer Zeit verarbeitet werden können.

Grundsätzlich wird bei der Realisierung von tragenden Anwendungen, sowohl als Tragelement bzw. bei ganzen Tragstrukturen immer eine Zustimmung im Einzelfall notwendig werden, da die 3D-Wabenplatte schon in ihrem Strukturgefüge eine flächige Verklebung aufweist und keine Zulassung für konstruktive Anwendungen besitzt. Nicht geregelt ist zudem wie in Kapitel 5.1.3 bereits erwähnt, die Anwendbarkeit von technischen Richtlinien, zum Beispiel aus dem konstruktiven Glasbau. Das Brandverhalten sowie der Einfluss der Verformung des 3D-Wabenkerns bei Langzeitbelastung sind weitere offene Fragen, die im Rahmen eines weiteren Marktreifeprozesses des Plattentyps untersucht werden müssten.

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

6.1 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass transluzente Sandwichstrukturen in geeigneter Bauweise ein vergleichbares bzw. aufgrund ihrer Lichtdurchlässigkeit erweitertes konstruktives Potential gegenüber konventionellen opaken Sandwichsystemen aufweisen können. Das Einsatzfeld stranggepresster Stegplatten aus transluzenten Thermoplasten ist aus statisch-konstruktiver Sicht aber eher eingeschränkt. Im direkten Vergleich weist die transluzente „3D-Wabenplatte“ die beste Eignung auf, da diese den Sandwicheffekt am besten auszunutzen vermag und in allen Richtungen gleichwertige Trageigenschaften aufweist. Die gewichtsneutrale, stufenlose Variation der Kernstärke stellt einen weiteren wesentlichen Vorteil bei der Fertigung dar und lässt sich direkt zur Steuerung der Trageigenschaften nutzen. Ein anderer Vorteil dieses Plattentyps besteht in der Möglichkeit, verschiedene Schichtwerkstoffe in geeigneter Stärke und Schichtenfolge anzuordnen. Die Schichtfuge ist aber im Gegensatz zu Stegplatten nicht stoffschlüssig und muß durch Verklebung hergestellt werden, was einen zusätzlichen Arbeitsgang darstellt und einen erhöhten Fertigungsaufwand bedeutet. Auf der anderen Seite läßt die erweiterte „Konfektionierbarkeit“ des Sandwichverbundes aber eine individuelle Einstellung der Eigenschaften auf das jeweilige Anforderungsprofil zu. Die Trageigenschaften konventioneller opaker Metall-Hartschaumverbunde werden jedoch kaum erreicht werden können, da die zur Lichtdurchlässigkeit zwingend notwendige Strukturierung der Kernschicht eine gleichwertige Ausnutzung des Sandwicheffekts nicht zulässt.

Wie in den einzelnen Untersuchungen deutlich geworden ist, sind transparente Thermoplaste wie Polycarbonat oder Acrylglas zur Ausbildung lichtdurchlässiger, räumlicher Strukturkerne geradezu prädestiniert. Vorteile wie die geringe Rohdichte, die hohe Transparenz, sowie die sehr gute thermische Formbarkeit werden zur Herstellung der räumlichen Kernstruktur der „3D-Wabenplatte“ besonders effektiv genutzt. Der thermisch geformte Kern bewirkt das in Kapitel 3 und 4 festgestellte, gute Stabilitätsverhalten der 3D-Wabenplatte in alle Richtungen. Wie Kapitel 4.3 zeigte, sind grundsätzlich auch andere räumliche Kerngeometrien nach dem gleichen Herstellprinzip mit Thermoplasten denkbar. Der polymere Kernraum ermöglicht nach Kapitel 5.2 zudem die Anordnung einer breiten Palette an Fügetechniken. Für ebene, dünne Deckschichten eignen sich Thermoplaste aus statisch-konstruktiver Sicht aber weniger. Effektiver ist nach Kapitel 4.3 die Kombination mit anderen transluzenten Werkstoffen, die ihrerseits aber auch materialspezifische Vor- und Nachteile mit sich bringen. Glaswerkstoffe eignen sich mit ihrer hohen Dehnsteifigkeit, Festigkeit sowie Witterungsbeständigkeit als Deckschichtlage besonders gut, deren ungünstiges Spröbruchverhalten wird im Verbund mit der polymeren Kernschicht kompensiert. Wichtig ist hier die Wahl der richtigen Klebesysteme, die die materialspezifischen Eigenheiten der Schichtwerkstoffe berücksichtigen und die Lichtdurchlässigkeit im Verbund garantieren. Thermoplastische Kunststoffe sollten nicht als universale Werkstoffe begriffen werden, die in allen Schichten des Verbundes angeordnet werden und folglich „alles können“ müssen, sondern als Werkstoffe, die in der Kernschicht optimal positioniert sind.

Der aufgezeigte konstruktive Mehrwert einer gezielten Kombination unterschiedlicher lichtdurchlässiger Werkstoffe in Sandwichstrukturen wird bisher nicht genutzt. Dies mag zum einen daran liegen, dass die Produkthersteller aus ihrer Firmenphilosophie heraus entweder einen bestimmten Grundwerkstoff und eine speziell darauf entwickelte Verfah-

renstechnik vertreten oder aber die Möglichkeiten eines erweiterten Anwendungsspektrums bisher noch nicht erkannt haben. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass sich die Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe aus verfahrenstechnischer Sicht sicherlich aufwendiger gestalten wird, es ergeben sich aber höherwertige Produkte. Wie in Kapitel 4.4.2 angemerkt wurde, ist die Wiederverwertung der Verbundkomponenten in einem nachhaltigen Werkstoffkreislauf auch nur dann möglich, wenn die Verbundwirkung des Klebmittels in der Fuge durch geeignete Techniken „deaktiviert“ werden kann. Eine Weiterentwicklung von transluzenten Sandwichstrukturen in die aufgezeigte Richtung wird daher nur in Zusammenarbeit mit Herstellern möglich sein, die über entsprechendes Know-How, vor allem im Bereich der Klebtechnologie verfügen. Ein technisch einwandfreier und wirtschaftlicher Herstellprozess sowie geeignete Pilotprojekte sind für eine mögliche Marktreife neuartiger transluzenter Sandwichverbunde notwendig.

6.2 Ausblick

Das aufgezeigte konstruktive Potential transluzenter Sandwichstrukturen mit polymeren Wabenkern wie die „3D-Wabenplatte“ lässt zahlreiche Fragen offen, aber auch Spielraum für weitergehende Überlegungen und Visionen:

- Unklar erscheint die großflächige Herstellung von Glas- oder GFK-Sandwichen, da die in Kapitel 4.3 gewählte UV-Klebetechnik nach Angabe der Klebstoffanbieter vorrangig für kleinere Klebeflächen geeignet ist. Auch unter diesen Aspekt wird die Entwicklung bzw. statische Untersuchung produktionsgerechter Klebetechniken notwendig werden.
- Wie bereits in Kapitel 4.3 und 5.1 erwähnt, ist der Einfluss unterschiedlicher Deckschichtwerkstoffe auf die Brandbeständigkeit der Sandwichgefüge ungeklärt. Schwachstelle ist der thermoplastische Wabenkern, der nur Gebrauchstemperaturen bis ca. 90° C zulässt. Auch dessen Kriechverhalten bei Langzeitbeanspruchung müsste untersucht werden.
- Transluzente Sandwichstrukturen sollten nicht nur als „Halbzeug“ angeboten werden, sondern könnte wie in Kapitel 5.2.3 angeregt in einem erweiterten Vorfertigungsgrad durch Integration von Fügetechnik zu Konstruktionssystemen weiterentwickelt werden.
- Die gute Formbarkeit von thermoplastischen und faserverstärkten Kunststoffen wirft die Frage auf, ob auch räumlich gekrümmte Formen transluzenter Sandwichstrukturen realisierbar wären. Für die „3D-Wabenplatte“ würde das bedeuten, die drei Schichtkomponenten vor Verklebung ähnlich einer monolithischen Platte thermisch über einem entsprechenden Werkzeug in Form zu bringen. Als Deckschichtwerkstoffe kämen demnach nur Kunststoffe in Betracht. Eine passgenaue Formung von Deckschichten und Kern und deren anschließende Verklebung erscheinen noch schwer umsetzbar. Eine andere Überlegung wäre, das Prinzip der Schaumkerne aus Kapitel 1.2 auf transluzente Kunststoffe zu übertragen. Der Zwischenraum zweier räumlich gekrümmter transluzenter Deckschichten ließe sich ausschäumen. Der Schubverbund würde durch Stoffschluss effektiver werden. Die Verarbeitung von Schäumen ist bei opaken Sandwichstrukturen gängige Praxis, eine lichtdurchlässige Variante ist nach letzter Recherche aber noch nicht auf dem Markt.

Wie gezeigt, ist weiteres Entwicklungspotential in verschiedenen Richtungen vorhanden. Eine weitergehende Forschung und Entwicklung ist jedoch nur in Zusammenarbeit mit potentiellen Herstellern der Kunststoff- und Glasbranche sinnvoll.

7. Literatur- und Bildnachweis

7.1 Literaturnachweis

- [ada07] Hubertus Adam: „Verwertung der Landschaft“ - Fensterfabrik in Hagedorn; in: Bauwelt, Ausgabe 9, 98. Jahrgang 2007, S. 28ff.
- [air06] Airbus Industries - Präsentation „Verwendung von Sandwichkonstruktionen in Komponenten der A320-Baureihe“ von Klaus-Dieter Zyrull beim Besuch am 18.10.2005; Hamburg-Finkenwerder 2005
- [bau06-10] Sports- and Culture Center Holmbladsgade, Kopenhagen; in: Bauwelt, Ausgabe 10, 98. Jahrgang 2007, S.24ff.
- [bba05] Turnhalle in Zürich - Blendfrei ohne Verschattung; in: BBA Bau Beratung Architektur, Sonderdruck aus Ausgabe August 2005
- [beu99] Adrian Beukers, Ed van Hinte: Lightness
2. Auflage, Rotterdam 1999
- [chr71] Gerhard Christmann: Statistische Verfahren
Baden Baden Bad Homburg v.d.Höhe 1971
- [bdb00] Distributionszentrum Bobingen; in: db Deutsche Bauzeitung, Sonderveröffentlichung zum Balthasar-Neumann-Preis 2000, S.14ff.
- [bdb03-1] Axel Simon: „Reales Landleben - Einfamilienhaus mit Atelier in Gleißenberg“; in: db Deutsche Bauzeitung, Ausgabe 1, 137. Jahrgang 2003, S.48ff.
- [bdb05-8] Werner Jakob: „Minimalistisches Outfit - Zweifamilienhaus in Mülheim“
in: db Deutsche Bauzeitung, Ausgabe 8, 139. Jahrgang 2005, S.54ff.
- [det05-11] Bernhard Weller, Susanne Rexroth: „Material wirkt - Neue Entwicklungen an der Fassade“; in: DETAIL Zeitschrift für Architektur+Baudetail, Ausgabe 11, Serie 2005, S.1292f.
- [det06-7] Wohnungen für Senioren in Domat/Ems
in: DETAIL Zeitschrift für Architektur+Baudetail, Ausgabe 6, Serie 2007, S.633ff.
- [deu01] Deutscher Werkbund Bayern (Hrsg.): Frei Otto, Bodo Rasch: Gestalt finden, 3.Auflage 2001
- [dtv71] dtv-Lexikon - ein Konversationslexikon in 20 Bänden
Band 16, München 1971

- [erf94] Hellmut Erfurth: Im Rhythmus der Zeit - Hugo Junkers und die zwanziger Jahre, Dessau 1994
- [füh03] Wilfried Führer, Franz Krauss, Thomas Jürges: Tabellen zur Tragwerklehre, Hochschulausgabe 9. Auflage, Aachen 2003
- [hab02] Gerd Habenicht: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendung 4. Auflage, Berlin Heidelberg New York 2002
- [hes05] Rudolf Hess, Bernhard Weller: Glasbau-Praxis in Beispielen - Konstruktion und Berechnung, Berlin 2005
- [hex04] Hexcel Composites Inc.
Introduction 2004
- [hin03] Ed van Hinte: Material World - Innovative Structures and Finishes for Interiors, Amsterdam 2003
- [hin72] Gert Hintersdorf: Tragwerke aus Plasten
Berlin/Stuttgart 1972
- [jun94] Kurt Junghanns: Ein Haus für alle - Zur Geschichte der Vorfertigung in Deutschland, Berlin 1994
- [kal03] Frank Kaltenbach (Hrsg.): Transluzente Materialien, Glas - Kunststoff - Metall, Edition Detail, München 2003
- [kle05] Bernd Klein: Leichtbaukonstruktionen
Wiesbaden 2005
- [kli06] Claudia Klinkenbusch (Konzept): Holzbauten der Moderne - Architekturführer Holzbauten in Niesky, Niesky 2006
- [klo07] Harald Kloft, Sven Kling, Florian Mähl, Jürgen Scholte-Wassink, Martin Schroth: Anschaulich, Tragwerkslehre im Experiment 2002-2007, Kaiserslautern 2007
- [kos00] Rolf Koschade: Die Sandwichbauweise
Berlin 2000
- [kra96] Franz Krauss, Wilfried Führer, Thomas Neukäter: Grundlagen der Tragwerklehre I, Hochschulausgabe 7. Auflage, Aachen 1996
- [kra99] Joachim Krausse, Claude Lichtenstein (Hrsg.): Your private sky - R.Buckminster Fuller, Design als Kunst einer Wissenschaft, Zürich 1999
- [lau01] Sebastian Lauff: Der Traum vom Bauen - Hugo Junkers und die Architektur, Berlin 2001

- [mäh05] Florian Mähl, Harald Kloft, Sven Kling: Bauen mit Kunststoffen; tek-Themenheft 7, Fachgebiet Tragwerksentwurf und Konstruktionen, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern 2005
- [men98] Georg Menges: Werkstoffkunde Kunststoffe
4. Auflage, München/Wien 1998
- [nac03] Werner Nachtigall: Baubionik, Natur - Analogien - Technik
Berlin/Heidelberg/New York 2003
- [pfä05] Jörg Pfäffinger: „Voller Durchblick beim Sport“ - Doppelturnhalle in Buchwiesen bei Zürich; mikado, Sonderdruck aus Ausgabe 6/2005
- [qua74] Arthur Quarmby: The Plastics Architect
London 1974
- [rgf04] Faserverbundwerkstoffe: Neue Werkstoffe - neue Technologien
Broschüre zur Anwendung und Verarbeitung; R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, Waldenbuch 2004
- [ric02] Klaus Richter, Jan-Michael Rost: Komplexe Systeme
Frankfurt am Main 2002
- [sch01] Christian Schittich (Hrsg.): im Detail: Gebäudehüllen, Konzepte-Schichten-Material, München, Basel 2001
- [sta74] Klaus Stamm, Horst Witte: Sandwichkonstruktionen - Berechnung, Fertigung, Ausführung, Ingenieurbauten 3, Wien New York 1974
- [sul02] Peter Sulzer: Jean Prouvé, Highlights 197-1944
Basel 2002
- [veg06] Alexander von Vegesack (General Editor): Jean Prouvé - The poetics of the technical object, 1. Auflage, Vitra Design Museum, Weil am Rhein 2006
- [zij05] Material Skills - Evolution of Materials
Rotterdam 2005

7.2 Zitierte technische Informationen zu den untersuchten Produkten

[bay06]	Online-Produktinformation der BayerSheetEurope, Darmstadt www.bayersheeteurope.de, Stand: 01.04.2006
[bli04]	„Fotoblizz“ Ausgabe 2004 Blizzard Composite GmbH, Mittersill 2004
[hun04]	Technische Information zu „Araldite 2026 (XD 4700/XD 4710) Zweikomponenten-PU-Klebstoffsystem, August 2004, Publikations-Nr. A 441 e D, Huntsman Advanced Materials, Switzerland
[neo07]	„clear pep et air-board de neomat“ Produktbroschüre der NeomatAG, Beromünster 2007
[rod06]	Online-Produktinformation der Rodeca GmbH, Mühlheim a.d.R. www.rodeca.de, Stand: 01.04.2006
[röh06]	Online-Produktinformation der Röhm GmbH, Darmstadt www.plexiglas.de, Stand: 01.04.2006
[sco06]	Produktbroschüre der Scobalit AG, Winterthur, Stand: 01.09.2006
[wac04]	Online-Produktinformation der Wacotech GmbH, Bielefeld www.plexiglas.de, Stand: 01.11.2004
[wih06]	Produktbroschüre der Wihag AG, Stadn: 15.11.2006
[wel06]	Technische Information zu „Photowell DA 1015“ (Entwicklungsprodukt), UV/Licht-vernetzender Klebstoff, Version vom 14.07.2006, Wellmann Technologies GmbH, Friedelsheim

7.3 Bildnachweis

Alle Bilder sind Diagramme, Grafiken, Illustrationen oder Fotos des Autors, mit Ausnahme der nachfolgend aufgeführten Bilder. Abkürzungen der Literaturquellen gemäß Literaturnachweis.

Bild-Nr.	Quelle	Bild-Nr.	Quelle
1.15	[kos00] S.65, Abb. 3.30	2.86	osd, Frankfurt/M.
1.17	[air06]	4.15	[nac03] S.133 unten / Abb. 83
1.18	[air06]	4.16	(b) [nac03] S.132 / Abb. 81 u.;
1.20	[kos00] S.82, Abb. 3.55		(c) [nac03] S.133 / Abb. 82 o.
1.21	[kos00] S.267, Abb. 8.60	4.18	(c) [deu01] S.50, Abb. 2;
1.22	[kos00] S.34, Abb. 2.14		(d) [deu01] S.29, Abb. 1
1.23	[sul02] S.73, Abb. 34	4.19	[nac03] S.143 oben / Abb. 94 C,D
1.24	[sul02] S.124, Abb. 704,29	4.59	http://www.glas-mueller.com/images/glasbruch.jpg , 26.10.2007
1.25	[lau01] S.111, Abb. 7.13	4.60	[hes05] S.94, Abb. 9.2
1.26	[lau01] S.112, Abb. 7.14	5.01	[neo07] S.1 oben
1.32	[kal03] S.53, Abb. 15	5.05	[bli04] S. 6 unten
1.34	[wac04]	5.06	[bli04] S. 4 oben
1.38	[bdb03-1] S.48		
2.06	[bay06]		
2.11	[det06-7] S.633		
2.12	[det06-7] S.633		
2.15	[bay06]		
2.16	[rod06]		
2.17	[kal03] S.54, Abb. 18		
2.19	[bay06]		
2.25	[neo07]		
2.26	[bli04]		
2.32	[bli04]		
2.33	[bli04], [pan07]		
2.34	[wih06]		
2.35	[wac04]		
2.54	[ada07]		
2.60	[pfä05]		
2.61	[pfä05]		
2.63	[bdb00] S.14ff.		
2.64	[bdb00] S.14ff.		
2.65	[bdb00] S.14ff.		
2.72	C.Hefe, Frankfurt/M.		
2.73	C.Hefe, Frankfurt/M.		
2-75	[bdb03-1] S.48		
2-80	[bdb05-8] S.54ff.		
2.82	[bdb05-8] S.54ff.		
2.83	osd, Frankfurt/M.		
2.84	osd, Frankfurt/M.		
2.85	osd, Frankfurt/M.		

**Untersuchungen zur tragkonstruktiven Eignung
transluzenter Sandwichstrukturen mit polymerer Kernschicht**

ANHANG

zur vom Fachbereich Architektur, Bauingenieurwesen, Raum- und Umweltplanung
der Technischen Universität Kaiserslautern

zur Verleihung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Florian Mähl

aus Frankfurt am Main

Mündliche Prüfung am 13.11.2008

Dekanin: Prof. Dr. Gabi Troeger-Weiss

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr. Matthias Schirren

Berichterstatter: Prof. Dr. Harald Kloft, Prof. Bernd Meyerspeer

8. Anhang

Inhaltsverzeichnis

Technische Datenblätter zu den verwendeten Klebesystemen

Klebesystem „WellmannTech WT-DA 1015“	A5
Klebesystem „Huntsman Araldite 2026“	A6

Meßdaten und Auswertungen (Kennung Versuchsreihe)

zu Kapitel 3.3.1 Versuchsreihen - Biegung

B01	A10
B02	A12
B03	A14
B04	A16
B05	A18
B06	A20
B07	A22

zu Kapitel 3.3.2 Versuchsreihen - Zentrischer Druck

D01	A24
D02	A26
D03	A28
D04	A30
D05	A32
D06	A34
D07	A36

zu Kapitel 3.3.3 Versuchsreihen - Abscheren

S01	A38
S01q	A39
S02	A40
S03	A41
S04	A42
S05	A43
S06	A44
S07	A45

zu Kapitel 4.1.2 Statisch-konstruktive Untersuchung der Kernschicht

Biegung Kern	A46
Druck Kern	A48
BV20	A50
BV80	A52
EZ20	A54
EZ40	A56
EZ80	A59

zu Kapitel 4.3 Variation in der Deckschichtlage

Biegung GFK-PC	A61
Biegung Glas-PC	A64
Biegung Glas/PC-PC	A66
Druck GFK-PC	A68
Druck Glas-PC	A70
Abscheren GFK-PC	A71
Abscheren Glas-PC	A72

Vorversuche zur Auswahl der geeigneten Klebessysteme

UV-Klebesystem „WT 1001“	A73
UV-Klebesystem „WT 1011“	A76
UV-Klebesystem „WT 1015“	A82
Zweikomponenten-Klebesystem „Araldite 2026“	A84

(Erster Buchstabe B=Biegung, D=Druck, S=Abscheren, E=Querdruck)

Glossar verwendeter Kenngrößen	A85
--------------------------------	-----



Wellmann Technologies GmbH · Hauptstr. 96 · D-67159
Friedelsheim · Tel +49 (0)6322 958 531
info@wellmanntech.de · http://www.wellmanntech.de

Technische Information Photowell DA 1015 (Entwicklungsprodukt)

UV/Licht-vernetzender Klebstoff
Version vom 14.07.2006

Allgemeines

Beschreibung	Einkomponentiger, lösungsmittelfreier UV/Licht-härtender Klebstoff mit hoher Flexibilität	
Anwendung	Glas/Glas, Glas/Metall, Glas/Kunststoff-Klebungen, sehr gute Haftung auch auf schwierig zu klebenden Kunststoffen wie z.B. PA6.6, PPS, PPA.	
Produkteigenschaften	Mittelviskos, thixotropiert, sehr flexibel, sehr gute Haftung auf Glas und Metallen, hoch schlagzähmodifiziert, beständig in Stoß- und Vibrationsbelastungen, Temperaturschockbeständig, vergilbungs- und feuchtigkeitsbeständig	
Härtung	Absorption im Bereich 320 bis 420 nm, Galliumstrahler oder Quecksilberstrahler zur Härtung empfohlen. Härtet auch sehr stark mit Tageslicht.	

Produktbeschreibung/ Verarbeitung

Eigenschaft	Methode	Resultat
Chemischer Typ		Methacrylat/ Acrylat
Aussehen	Visuell	Transparent, Klar nach Aushärtung im dünnen Spalt
Dichte	DIN 53217	1,05 g/cm ³
Viskosität 23°C	Haake RV 20, Scherrate 60/s	4000 - 6000 mPas
Lagerstabilität		Im ungeöffneten Originalgebinde 12 Monate bei 7°C bis 25°C

Endeigenschaften

Eigenschaft	Methode	Resultat
Zugfestigkeit	DIN 53455	16 N/mm ² <i>16 N/mm²</i>
Reißdehnung	DIN 53455	184%
Wasseraufnahme	20°C, 24 Std.	1,70%
UV-Dosis zur vollständigen Härtung des Produktes	Reaktionsenthalpie gemessen mit UVAHand 250, Eisenstrahler, UVA-Intensität 25 mW/cm ² , Schichtdicke 2 mm	880 mJ/cm ²

Unsere Empfehlungen beruhen auf Untersuchungen und Erfahrungen, die wir für zuverlässig halten. Weil wir jedoch nicht in der Lage sind, die Umstände, unter welchen unsere Produkte befördert, gelagert und verarbeitet werden, zu kontrollieren, können wir keine Garantie für bestimmte Ergebnisse gewähren. Wir können auch nicht für eventuelle Schäden, mittelbar oder unmittelbar aus der Anwendung hervorgehend, haften. Unsere Vertretungen sind nicht ermächtigt, diese Bedingungen zu ändern oder zu widerrufen.



Structural Adhesives

Araldite® 2026 (XD 4700/XD 4710)

Zweikomponenten-PU-Klebstoffsystem

Spezifische Eigenschaften

- Gute Klebverbindungen bei den meisten Thermoplasten, Metallen und Glas
- Flexibel
- Transparent - wasserklar
- Aushärtung bei Raumtemperatur

Produktbeschreibung

Araldite 2026 ist ein klar-transparenter, bei Raumtemperatur aushärtender Polyurethan-Zweikomponentenklebstoff für die Verklebung von Thermoplasten (z.B. Polycarbonat) und von Kunststoffen zu Metall und Glas.

Typische Produktdaten

Eigenschaften	2026/A	2026/B	2026 (gemischt)
Farbe (visuell)	transparent	transparent	transparent
Dichte	ca 1,1	ca 1,1	ca 1,1
Viskosität (Pas)	10 - 20	7 - 11	ca. 10
Gebrauchsdauer (100 g bei 25°C)	-	-	3 - 4 Minuten

Verarbeitung**Vorbehandlung**

Voraussetzung zum Erreichen fester und dauerhafter Verklebungen ist eine zweckmässige Vorbehandlung der Klebfläche. Die metallischen Substrate Klebflächen werden am besten mit einem guten Fettlösungsmittel wie z.B. Aceton, oder einem firmenspezifischen Fettlösungsmittel gründlich von Öl, Fett und Schmutz gereinigt. Alkohol, Benzin oder Lackverdünner sollten hierfür nicht verwendet werden.

Beste Festigkeiten werden erreicht, wenn die entfetteten metallischen Substrate Klebflächen mechanisch aufgeraut oder chemisch vorbehandelt werden.

Thermoplastische Kunststoffe wie PVC, Polycarbonat, PET und PMMA werden am besten mit Petrolumether (Siedepunkt 40-60°C) oder Isopropanol entfettet. Lösemittel wie zB. Aceton können die Kunststoffoberflächen angreifen und sollten deshalb nicht verwendet werden.

Leichtes Aufrauen kann bei PVC und PMMA eine höhere Festigkeit bewirken, bei Polycarbonat kann es jedoch Spannungsrisskorrosion hervorrufen.

Mischungsverhältnis	Gewichtsteile	Volumenteile
Araldite 2026/A	100	100
Araldite 2026/B	100	100

Harz und Härter werden in Kartuschen, komplett mit Mischer, angeboten und können mit dem von Huntsman Advanced Materials empfohlenen Werkzeug als gebrauchsfertiger Klebstoff verarbeitet werden. Arbeitsdauer im Mischer ungefähr 5 Minuten.

Auftragen des Klebstoffs

Die Harz-/Härtermischung wird direkt oder mit einer Spachtel auf die vorbehandelten und trockenen Klebflächen aufgetragen.

Klebfugen von 0,05 bis 0,10 mm Dicke ergeben grundsätzlich die besten Zugscherfestigkeiten.

Nach dem Auftragen des Klebstoffs werden die Werkteile zusammengefügt und sofort fixiert. Ein gleichmässig guter Kontaktdruck gewährleistet optimale Härtung.

Maschinelle Verarbeitung

Zur Verarbeitung grosser Klebstoffmengen wurden von spezialisierten Firmen Dosier-, Misch- und Auftragsgeräte entwickelt. Huntsman Advanced Materials berät Sie gerne bei der Auswahl anwendungsspezifischer Ausstattungen.

Reinigung der Werkzeuge

Alle Werkzeuge werden am besten mit heissem Wasser und Seife gereinigt, bevor Klebstoffrückstände anhäften können. Das Entfernen bereits gehärteter Rückstände ist mühsam und zeitraubend.

Bei Verwendung eines Lösungsmittels wie beispielsweise Aceton sind die üblichen Vorsichtsmassnahmen zu beachten. Ausserdem ist der Kontakt mit Haut und Augen zu vermeiden.

Härtungsbedingungen

Temperatur	°C	10	15	23	40	60	100
Härtungsdauer	Stunden	4	2½	1	-	-	-
ZSF > 1N/mm ²	Minuten	-	-	-	15	6	2
Härtungsdauer	Stunden	60	15	8	4	-	-
ZSF > 10N/mm ²	Minuten	-	-	-	-	30	12

ZSF = Zugscherfestigkeit.

**Typische
Härtungs-
eigenschaften**

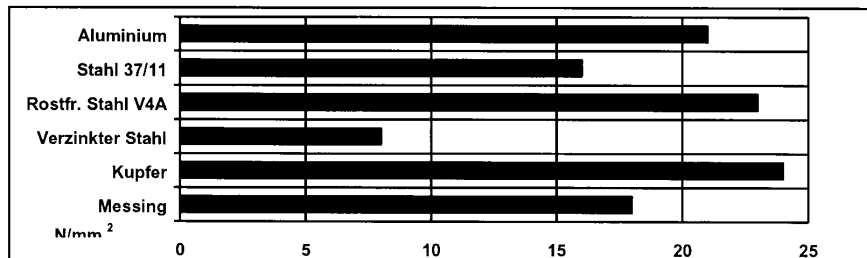
Falls nicht anders angegeben, wurden zur Ermittlung der unten angegebenen Werte Standardprüfkörper aus Aluminiumlegierung mit den Massen 170 x 25 x 1,5 mm verwendet. Die Überlappungsfläche betrug jeweils 12,5 x 25 mm

Die Werte wurden nach Standardprüfverfahren an typischen Produktionschargen bestimmt. Sie dienen ausschliesslich der technischen Information und stellen keine Produktspezifikation dar.

Typische Mittelwerte der Zugscherfestigkeit verschiedener Metallverklebungen (ISO 4587)

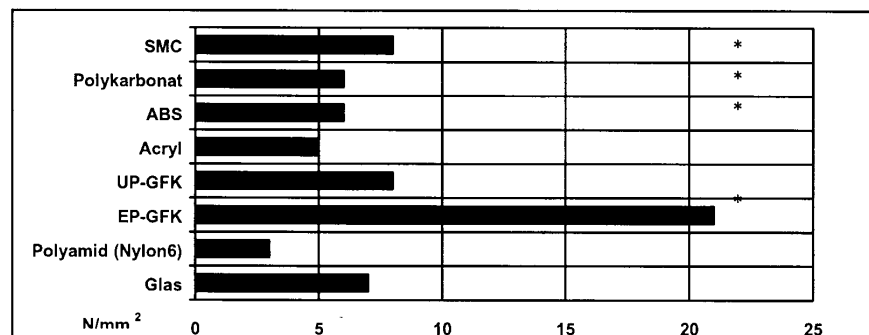
Härtung: 16 Stunden bei 40°C; Prüftemperatur: 23°C

Vorbehandlung - Sandstrahlung

**Typische Mittelwerte der Zugscherfestigkeit nichtmetallischer Verbindungen (ISO 4587)**

Härtung: 16 Stunden bei 40°C; Prüftemperatur: 23°C

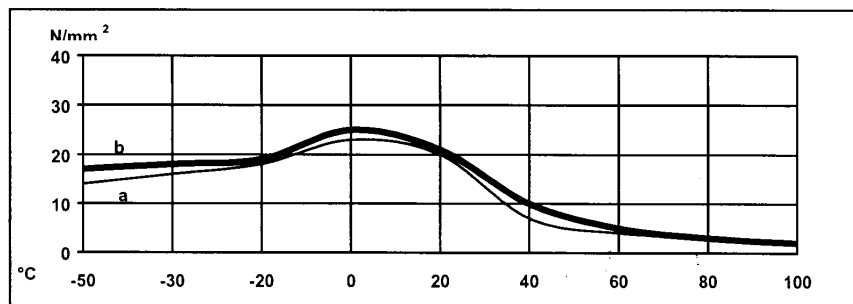
Vorbehandlung – Leichtes Aufrauen und Entfetten mit Propanol. (Glas – nur Entfetten)



* Zeigt Werkstoffversagen an

Zugscherfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur (ISO 4587) (typische Mittelwerte)

Härtung: (a) = 7 Tage bei 23°C; (b) = 24 Stunden bei 23°C + 30 Minuten bei 80°C

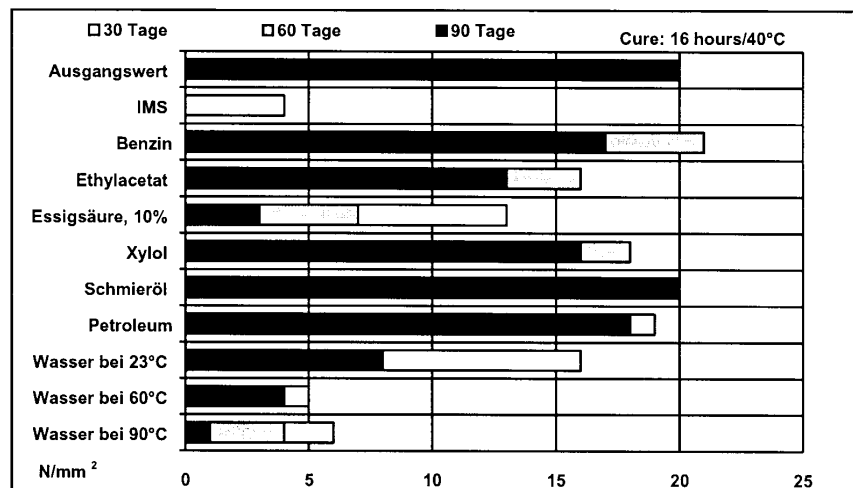


Rollenschälversuch (ISO 4578)

Härtung: 16 Stunden bei 40°C 8,0 N/mm
 Bruchdehnung bei 23°C 50%
 Zugfestigkeit bei 23°C (ISO R527) 18 MPa
 E-Modul 200 MPa
 Glasübergangstemperatur ca. 20°C

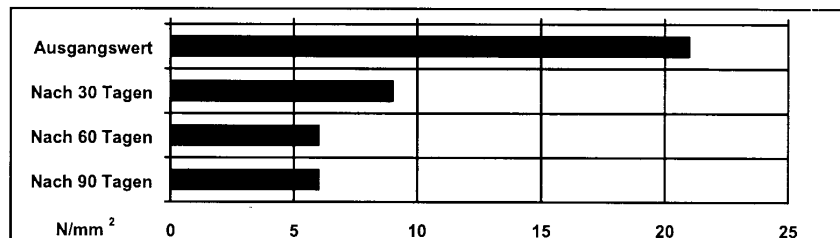
Zugscherfestigkeit nach Lagerung in verschiedenen Agenzien (typische Mittelwerte)

Falls nicht anders angegeben wurde die ZSF nach Lagerung von 90 Tagen bei 23°C bestimmt

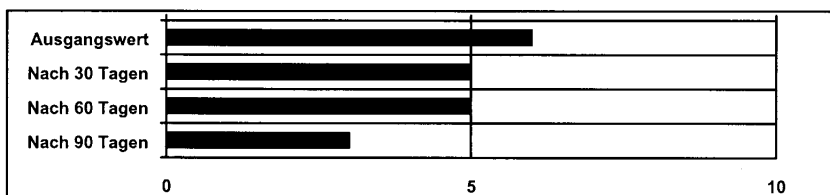


Zugscherfestigkeit nach Lagerung im Tropenklima

(40/92, DIN 50015; typische Mittelwerte) Härtung: 16 Stunden bei 40°C; Prüftemperatur: 23°C
 Auf Aluminium – entfettet und sandgestrahlt

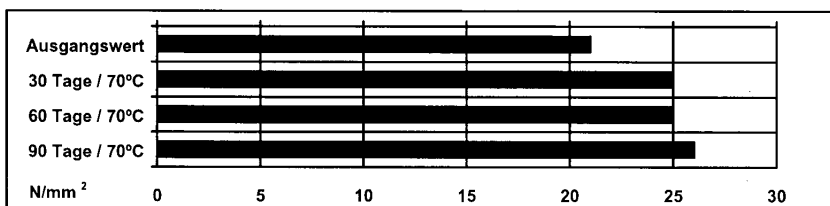


Auf Polykarbonat – Entfettet mit Isopropanol



Zugscherfestigkeit nach Wärmealterung, Härtung: 16 Stunden bei 40°C

Auf Aluminium – entfettet und sandgestrahlt



Temperaturwechselbeanspruchung

100 Zyklen von 6 Stunden Dauer bei Temperaturen von -30°C bis 70°C:

18 N/mm²

Schubmodul (G') DIN 53345

-50°C	1GPa
0°C	0,8GPa
20°C	0,6GPa
40°C	0,2GPa
60°C	10MPa

Biegefestigkeit/E-Modul (ISO 178) Härtung: 16 h/40°C (Prüftemperatur: 23°C)

Biegefestigkeit	5.5 MPa
E-Modul	274.2 MPa

Lagerung

Araldite 2026/A und Araldite 2026/B können bei 2-40°C gelagert werden, vorausgesetzt, dass sie in ihren Originalgebinden verbleiben. Das Verfalldatum ist auf der Verpackung angegeben. Nach dem Entfernen der Folien-Aussenverpackung sollten die Produkte sobald wie möglich verarbeitet werden.

Vorsichts-massnahmen

Achtung!

Huntsman Advanced Materials Produkte können ohne Gefahr verarbeitet werden, vorausgesetzt, dass die im Umgang mit Chemikalien üblichen Vorsichtsmassnahmen eingehalten werden. Ungehärtete Materialien sind von Lebensmitteln fernzuhalten. Um allergische Reaktionen zu vermeiden, wird dringend empfohlen, undurchlässige Gummi- oder Plastikhandschuhe, sowie eine Schutzbrille zu tragen. Nach jedem Arbeitsgang müssen die Hände mit warmem Wasser und Seife gründlich gewaschen werden. Die Verwendung von Lösungsmitteln ist zu vermeiden. Anschliessend wird die Haut mit Einwegpapiertüchern - keine Textilien - getrocknet. Der Arbeitsraum sollte gut durchlüftet sein; evtl. Absaugvorrichtung über dem Arbeitsplatz. Eine Beschreibung sämtlicher Vorsichtsmassnahmen ist in den Sicherheitsdatenblättern der Einzelprodukte enthalten. Gerne schicken wir Ihnen diese auf Anforderung zu.

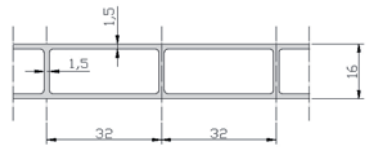
Huntsman Advanced Materials

Unsere anwendungstechnische Beratung in Wort, Schrift und durch Versuche erfolgt nach dem heutigen Stand unserer Kenntnisse. Sie befreit Sie jedoch nicht von der eigenen Prüfung der von uns gelieferten Produkte auf deren Eignung für die beabsichtigten Verfahren und Zwecke. Anwendung, Verwendung und Verarbeitung der Produkte erfolgen ausserhalb unserer Kontrollmöglichkeiten und liegen daher ausschliesslich in Ihrem Verantwortungsbereich. Etwa bestehende Schutzrechte Dritter sind zu berücksichtigen. Wir gewährleisten die einwandfreie Qualität unserer Produkte nach Massgabe unserer allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen.

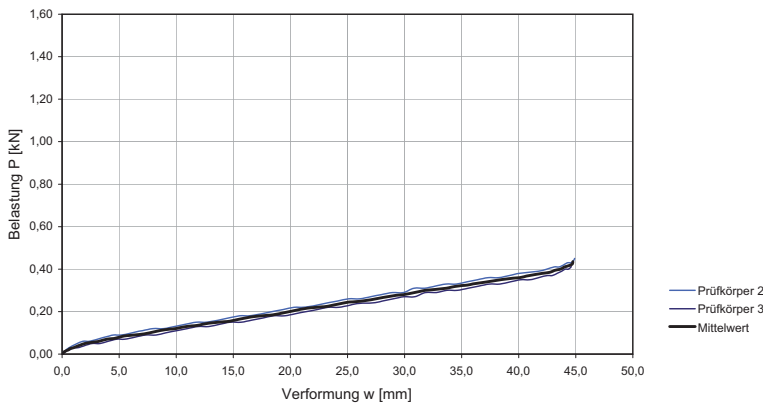
www.araldite.com

© 2004 Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH.

© Araldite ist eine eingetragene Handelsmarke von Huntsman LLC oder seinen Beteiligungsfirmen in einem oder mehreren, aber nicht allen Ländern.

B-01		Biegeversuch			
Einfachstegplatte SDP16-32, PMMA		800x160x16	558 g		PMMA schlagzäh
4-Punkt-Biegeversuch über 750 mm		5 mm/min	Zeit-Wege-Messung		
19.10.2006		3 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte		

Lastverformungsdiagramm B-01 / Hohlkammerplatte SDP16/980-32



Belastung P [kN]

Verformung w [mm]

— Prüfkörper 2
— Prüfkörper 3
— Mittelwert

B-01					
<u>Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse</u>			Anteilig	(blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)	
1	Steigungsgradient m	dP/dw	0,082 kN/cm		Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Durchbiegungsfaktor k	= 23/1296			Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]
3	Gesamtsteifigkeit B	= m k l³	611,060 kNcm²		Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse, Schubverformung eingeschlossen
<u>Vergleichskennwerte Steifigkeit</u>					
4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	B₀ = B / b	382 Nm²/m		breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=16 cm
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	= E I _y	430 Nm²/m		Berechnet mit I aus tatsächlichen Querschnitt und E des Werkstoffs
5a	Anteil Schubverformung	γ = 1 - B₀ / E I _y	11%		Schubverformung des Kerns
5b	Schubmodul G Kernschicht	= γ ml / 6db	0,395 kN/cm²		Berechnung nach [kle05]
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	B₀ = E₀ b d² / 2	402 Nm²/m		Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]
7	Äquivalentes E-Modul E _{Äq}	E _{Äq} = B / I _y	112 kN/cm²	44%	Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
7a	Vergleich: Vollplatte PMMA schlagzäh	E	255 kN/cm²		Tatsächlicher E-Modul des Materials nach Angabe Hersteller
8	Trägheitsmoment absolut	I _y	2,697 cm⁴	49%	Trägheitsmoment I _y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
8a	Vergleich: Vollplatte	I _l = h³b / 12	5,461 cm⁴		Trägheitsmoment I _y bezogen auf einen Referenz-Vollquerschnitt
<u>Leichtbaukennzahlen</u>					
8	Gewicht Platte	absolut	558 g	23%	Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
8a	Vergleich: Vollplatte PMMA		2458 g		Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 1,2 g/cm³
9	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	β = B / G	1,10	214%	Biegesteifigkeit pro Gewicht
9a	Vergleich: Vollplatte PMMA		0,51		Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

B-01

Messdaten

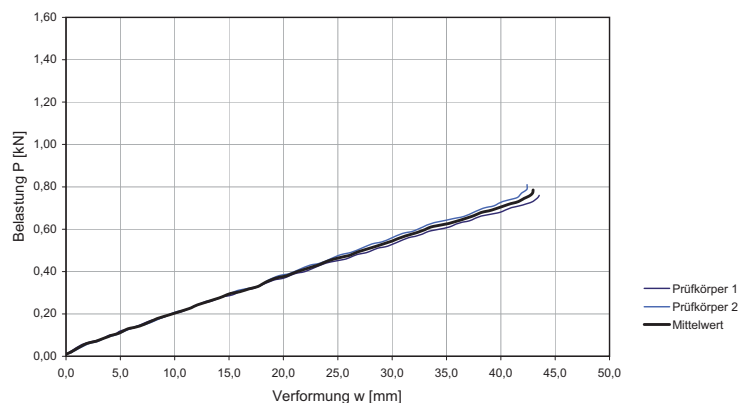
Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,005	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
0,075	0,000	0,094	0,010	0,245	0,010	0,170	0,010
0,270	0,010	0,118	0,010	0,550	0,020	0,334	0,015
0,556	0,010	0,451	0,020	0,682	0,020	0,567	0,020
0,959	0,020	0,358	0,020	0,960	0,030	0,659	0,025
1,538	0,030	0,622	0,030	1,391	0,030	1,007	0,030
2,256	0,030	0,947	0,040	1,982	0,040	1,465	0,040
3,096	0,040	1,326	0,050	2,631	0,050	1,979	0,050
3,924	0,050	1,822	0,060	3,316	0,050	2,569	0,055
4,784	0,060	2,432	0,060	4,030	0,060	3,231	0,060
5,627	0,060	3,081	0,070	4,783	0,070	3,932	0,070
6,438	0,070	3,801	0,080	5,492	0,070	4,647	0,075
7,273	0,080	4,473	0,090	6,396	0,080	5,435	0,085
8,037	0,090	5,234	0,090	7,313	0,090	6,274	0,090
8,909	0,100	6,131	0,100	8,227	0,090	7,179	0,095
9,716	0,100	7,028	0,110	9,104	0,100	8,066	0,105
10,528	0,110	7,966	0,120	10,026	0,110	8,996	0,115
11,362	0,120	8,905	0,120	10,963	0,120	9,934	0,120
12,251	0,130	9,846	0,130	11,900	0,130	10,873	0,130
13,134	0,130	10,798	0,140	12,844	0,130	11,821	0,135
14,002	0,140	11,756	0,150	13,799	0,140	12,778	0,145
14,871	0,150	12,699	0,150	14,725	0,150	13,712	0,150
15,749	0,150	13,654	0,160	15,683	0,150	14,669	0,155
16,612	0,160	14,605	0,170	16,630	0,160	15,618	0,165
17,475	0,170	15,549	0,180	17,584	0,170	16,567	0,175
18,340	0,180	16,494	0,180	18,520	0,180	17,507	0,180
19,183	0,180	17,457	0,190	19,484	0,180	18,471	0,185
20,040	0,190	18,416	0,200	20,447	0,190	19,432	0,195
20,912	0,200	19,357	0,210	21,387	0,200	20,372	0,205
21,757	0,210	20,319	0,220	22,350	0,210	21,335	0,215
22,610	0,210	21,264	0,220	23,292	0,220	22,278	0,220
23,447	0,220	22,220	0,230	24,239	0,220	23,230	0,225
24,275	0,230	23,180	0,240	25,199	0,230	24,190	0,235
25,057	0,230	24,128	0,250	26,148	0,240	25,138	0,245
25,789	0,240	25,093	0,260	27,088	0,240	26,091	0,250
26,430	0,250	26,068	0,260	28,058	0,250	27,063	0,255
26,789	0,260	27,022	0,270	29,003	0,260	28,013	0,265
26,791	0,260	27,974	0,280	29,953	0,270	28,964	0,275
26,793	0,270	28,934	0,290	30,888	0,270	29,911	0,280
26,793	0,280	29,891	0,290	31,837	0,290	30,864	0,290
26,792	0,280	30,840	0,310	32,780	0,290	31,810	0,300
26,794	0,290	31,764	0,310	33,704	0,300	32,734	0,305
26,786	0,300	32,680	0,320	34,623	0,300	33,652	0,310
26,785	0,310	33,611	0,330	35,559	0,310	34,585	0,320
26,784	0,310	34,547	0,330	36,495	0,320	35,521	0,325
26,783	0,320	35,467	0,340	37,428	0,330	36,448	0,335
26,786	0,330	36,388	0,350	38,346	0,330	37,367	0,340
26,786	0,340	37,322	0,360	39,269	0,340	38,296	0,350
26,785	0,340	38,250	0,360	40,166	0,350	39,208	0,355
26,786	0,350	39,172	0,370	40,964	0,350	40,068	0,360
26,785	0,350	40,075	0,380	41,762	0,360	40,919	0,370
26,786	0,360	41,722	0,390	42,450	0,370	42,086	0,380
26,786	0,370	42,459	0,400	42,933	0,370	42,696	0,385
26,786	0,370	43,102	0,410	43,376	0,380	43,239	0,395
26,786	0,380	43,544	0,410	43,767	0,390	43,656	0,400
26,785	0,390	43,953	0,420	44,079	0,400	44,016	0,410
26,786	0,400	44,287	0,430	44,352	0,400	44,320	0,415
26,786	0,400	44,574	0,430	44,599	0,410	44,587	0,420
26,785	0,410	44,804	0,440	44,598	0,410	44,701	0,425
26,786	0,410	44,906	0,450	44,596	0,420	44,751	0,435

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht.

B-02		Biegeversuch	
Einfachstegplatte SDP16-64	800x195x16	819 g	PMMA
4-Punkt-Biegeversuch über 750 mm	5 mm/min	Zeit-Wege-Messung	
19.10.2006	2 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte	



Lastverformungsdiagramm B-02 / Hohlkammerplatte SDP16-64



B-02

Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse			Referenz Vollplatte	(blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)
1	Steigungsgradient m	dP/dw	0,168 kN/cm	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Durchbiegungsfaktor k	$= 23/1296$		Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]
3	Gesamtsteifigkeit B	$= m \cdot k \cdot l^3$	1257,689 kNcm ²	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse, Schubverformung eingeschlossen
Vergleichskennwerte Steifigkeit				
4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	$B_0 = B / b$	645 Nm ² /m	breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=16 cm
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	$= E \cdot I_y$	671 Nm ² /m	Berechnet mit I aus tatsächlichen Querschnitt und E des Werkstoffs
5a	Anteil Schubverformung	$\gamma = 1 - B_0 / E \cdot I_y$	4%	Schubverformung des Kerns
5b	Schubmodul G Kernschicht	$= m_l / 6 \delta b \cdot g$	2,005 kN/cm ²	Berechnung nach [kle05]
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	$B_0 = E_0 \cdot t_0 \cdot d^2 / 2$	647 Nm ² /m	Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]
7	Äquivalentes E-Modul $E_{\text{Äq}}$	$E_{\text{Äq}} = B / I_y$	189 kN/cm ²	Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
7a	Vergleich: Vollplatte PMMA	E	330 kN/cm ²	Tatsächlicher E-Modul des Materials nach Angabe Hersteller
8	Trägheitsmoment absolut	I_y	3,963 cm ⁴	Trägheitsmoment I y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
8a	Vergleich: Vollplatte	$I_y = h^3 b / 12$	6,656 cm ⁴	Trägheitsmoment I y bezogen auf einen Referenz-Vollquerschnitt
Leichtbaukennzahlen				
8	Gewicht Platte	absolut	819 g	Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
8a	Vergleich: Vollplatte PMMA		2458 g	Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 1,2 g/cm ³
9	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	$\beta = B / G$	1,54	Biegesteifigkeit pro Gewicht
9a	Vergleich: Vollplatte PMMA		0,73	Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

B-02

Messdaten

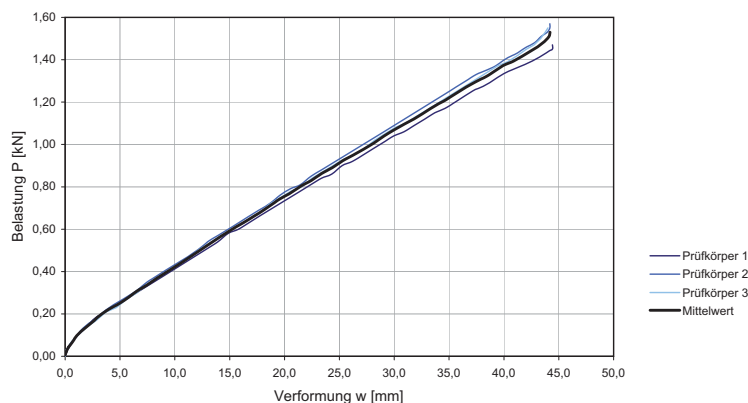
Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,001	0,010	0,001	0,010	0,001	0,010
0,381	0,020	0,570	0,020	0,476	0,020
0,942	0,040	1,300	0,040	1,121	0,040
1,670	0,060	2,112	0,060	1,891	0,060
2,477	0,070	2,930	0,070	2,703	0,070
3,239	0,080	3,719	0,090	3,479	0,085
4,020	0,100	4,544	0,100	4,282	0,100
4,422	0,100	5,441	0,120	4,931	0,110
5,013	0,120	6,365	0,140	5,689	0,130
5,958	0,130	7,303	0,150	6,631	0,140
6,904	0,150	8,262	0,170	7,583	0,160
7,837	0,170	9,195	0,190	8,516	0,180
8,769	0,180	10,112	0,210	9,440	0,195
9,701	0,200	11,049	0,220	10,375	0,210
10,618	0,210	11,986	0,240	11,302	0,225
11,539	0,230	12,919	0,260	12,229	0,245
12,481	0,250	13,826	0,270	13,154	0,260
13,391	0,260	14,786	0,290	14,088	0,275
14,338	0,280	15,744	0,310	15,041	0,295
15,298	0,290	16,687	0,320	15,993	0,305
16,248	0,310	17,629	0,330	16,938	0,320
17,208	0,320	18,125	0,340	17,667	0,330
18,153	0,340	18,611	0,360	18,382	0,350
19,112	0,360	19,570	0,380	19,341	0,370
20,072	0,370	20,529	0,390	20,301	0,380
21,051	0,390	21,483	0,410	21,267	0,400
21,981	0,400	22,428	0,430	22,204	0,415
22,933	0,420	23,391	0,440	23,162	0,430
23,906	0,440	24,344	0,460	24,125	0,450
24,855	0,450	25,288	0,480	25,071	0,465
25,797	0,460	26,219	0,490	26,008	0,475
26,738	0,480	27,178	0,510	26,958	0,495
27,700	0,490	28,140	0,530	27,920	0,510
28,653	0,510	29,074	0,540	28,863	0,525
29,591	0,520	30,000	0,560	29,795	0,540
30,555	0,540	30,958	0,580	30,757	0,560
31,506	0,560	31,892	0,590	31,699	0,575
32,434	0,570	32,826	0,610	32,630	0,590
33,376	0,590	33,765	0,630	33,570	0,610
34,318	0,600	34,722	0,640	34,520	0,620
35,250	0,610	35,655	0,650	35,452	0,630
36,190	0,630	36,604	0,660	36,397	0,645
37,121	0,640	37,494	0,680	37,307	0,660
38,058	0,660	38,451	0,700	38,254	0,680
38,993	0,670	39,339	0,710	39,166	0,690
39,936	0,680	40,139	0,730	40,037	0,705
40,863	0,700	40,870	0,740	40,866	0,720
41,684	0,710	41,530	0,750	41,607	0,730
42,362	0,720	41,902	0,770	42,132	0,745
42,924	0,730	42,201	0,780	42,563	0,755
43,415	0,750	42,413	0,790	42,914	0,770
43,527	0,760	42,420	0,810	42,973	0,785

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht.

B-03		Biegeversuch	
Dreifachstegplatte S4P-32/980-32	800x160x32	737 g	PMMA schlagzäh
4-Punkt-Biegeversuch über 750 mm	5 mm/min	Zeit-Wege-Messung	
11.10.2006	3 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte	



Lastverformungsdiagramm B-03 / Mehrfachstegplatte S4P-32/980-32



B-03

Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse

1	Steigungsgradient m	dP/dw	0,324 kN/cm
2	Durchbiegungsfaktor k	$= 23/1296$	
3	Gesamtsteifigkeit B	$= m \cdot k \cdot l^3$	2425,781 kNcm ²

Referenz Vollplatte (blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)

Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)

Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]

Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse,
Schubverformung eingeschlossenVergleichskennwerte Steifigkeit

4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	$B_0 = B / b$	1516 Nm ² /m
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	$= E \cdot I_y$	1704 Nm ² /m
5a	Anteil Schubverformung	$\gamma = 1 - B_0 / E \cdot I_y$	11%
5b	Schubmodul G Kernschicht	$= \gamma \cdot m \cdot l / 6db$	0,753 kN/cm ²
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	$B_0 = E_D \cdot t_D \cdot d^2 / 2$	1640 Nm ² /m
7	Äquivalentes E-Modul $E_{\text{Äq}}$	$E_{\text{Äq}} = B / I_y$	56 kN/cm ²
7a	Vergleich: Vollplatte PMMA	E	235 kN/cm ²
8	Trägheitsmoment absolut	I_y	11,600 cm ⁴
8a	Vergleich: Vollplatte	$I_y = h^3 b / 12$	43,691 cm ⁴

breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=16 cm

Berechnet mit I_y aus tatsächlichen Querschnitt und E des Werkstoffs
Schubverformung des Kerns
Berechnung nach [kle05]

Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]

24% Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
Tatsächlicher E-Modul des Materials nach Angabe Hersteller27% Trägheitsmoment I_y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
Trägheitsmoment I_y bezogen auf einen Referenz-VollquerschnittLeichtbaukennzahlen

8	Gewicht Platte	absolut	737 g
8a	Vergleich: Vollplatte PMMA		4915 g
9	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	$\beta = B / G$	3,29
9a	Vergleich: Vollplatte PMMA		2,09

15% Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 1,2 g/cm³158% Biegesteifigkeit pro Gewicht
Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

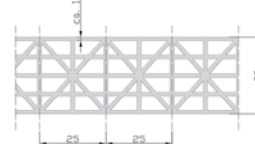
B-03

Messdaten

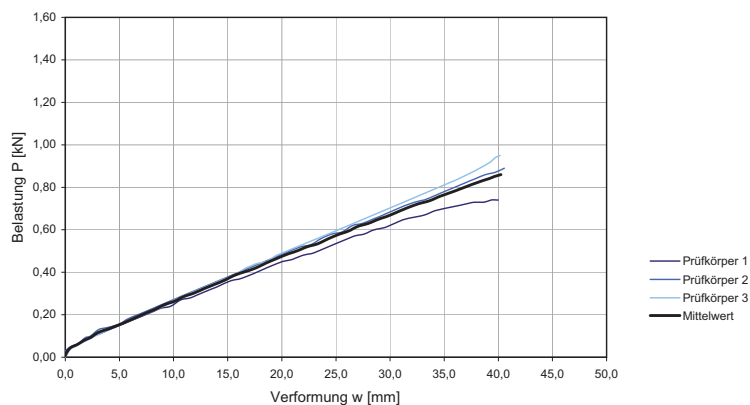
Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,001	0,000	0,001	0,020	0,001	0,000	0,001	0,007
0,069	0,010	0,249	0,040	0,034	0,020	0,117	0,023
0,218	0,030	0,622	0,070	0,095	0,030	0,312	0,043
0,603	0,060	1,016	0,090	0,488	0,060	0,702	0,070
0,951	0,090	1,397	0,120	0,930	0,090	1,093	0,100
1,377	0,110	2,022	0,150	1,383	0,110	1,594	0,123
1,973	0,140	2,853	0,180	2,032	0,140	2,286	0,153
2,730	0,180	3,743	0,220	2,840	0,170	3,104	0,190
3,675	0,210	4,641	0,250	3,736	0,210	4,017	0,223
4,612	0,240	5,590	0,280	4,668	0,230	4,957	0,250
5,539	0,270	6,532	0,310	5,134	0,250	5,735	0,277
6,490	0,300	7,463	0,350	5,611	0,270	6,521	0,307
7,438	0,330	8,400	0,380	6,561	0,300	7,466	0,337
8,393	0,360	9,292	0,410	7,496	0,340	8,393	0,370
9,307	0,390	10,220	0,440	8,443	0,370	9,323	0,400
10,220	0,420	11,147	0,470	9,357	0,400	10,241	0,430
11,152	0,450	12,067	0,500	10,255	0,430	11,158	0,460
12,072	0,480	12,977	0,540	11,201	0,460	12,083	0,493
12,997	0,510	13,929	0,570	12,127	0,500	13,017	0,527
13,920	0,540	14,871	0,600	13,074	0,530	13,955	0,557
14,858	0,580	15,791	0,630	13,990	0,560	14,880	0,590
15,793	0,600	16,724	0,660	14,918	0,590	15,812	0,617
16,724	0,630	17,679	0,690	15,878	0,620	16,760	0,647
17,675	0,660	18,614	0,720	16,806	0,650	17,698	0,677
18,609	0,690	19,567	0,760	17,756	0,680	18,644	0,710
19,554	0,720	20,504	0,790	18,697	0,720	19,585	0,743
20,492	0,750	21,451	0,810	19,648	0,750	20,530	0,770
21,445	0,780	22,424	0,850	20,596	0,780	21,488	0,803
22,396	0,810	23,386	0,880	21,546	0,800	22,443	0,830
23,347	0,840	24,323	0,910	22,488	0,840	23,386	0,863
24,295	0,860	25,278	0,940	23,448	0,870	24,340	0,890
25,242	0,900	26,237	0,970	24,423	0,900	25,301	0,923
26,193	0,920	27,174	1,000	25,381	0,930	26,249	0,950
27,137	0,950	28,107	1,030	26,315	0,950	27,186	0,977
28,081	0,980	29,054	1,060	27,260	0,980	28,131	1,007
29,020	1,010	29,985	1,090	28,218	1,020	29,074	1,040
29,958	1,040	30,931	1,120	29,152	1,050	30,013	1,070
30,891	1,060	31,870	1,150	30,085	1,080	30,948	1,097
31,838	1,090	32,809	1,180	31,011	1,100	31,886	1,123
32,789	1,120	33,731	1,210	31,941	1,130	32,820	1,153
33,701	1,150	34,690	1,240	32,894	1,160	33,761	1,183
34,622	1,170	35,599	1,270	33,826	1,190	34,682	1,210
35,556	1,200	36,527	1,300	34,728	1,220	35,604	1,240
36,471	1,230	37,459	1,330	35,682	1,250	36,537	1,270
37,397	1,260	38,387	1,350	36,605	1,280	37,463	1,297
38,333	1,280	39,207	1,370	37,547	1,310	38,362	1,320
39,246	1,310	39,772	1,390	38,449	1,340	39,156	1,347
40,180	1,340	40,355	1,410	39,396	1,370	39,977	1,373
41,100	1,360	41,167	1,430	40,331	1,390	40,866	1,393
42,004	1,380	42,039	1,460	41,227	1,420	41,757	1,420
42,807	1,400	42,788	1,480	42,041	1,450	42,545	1,443
43,481	1,420	43,399	1,510	42,750	1,470	43,210	1,467
44,053	1,440	43,950	1,530	43,337	1,500	43,780	1,490
44,416	1,450	44,184	1,550	43,760	1,530	44,120	1,510
44,416	1,470	44,188	1,570	44,009	1,550	44,204	1,530

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht.

B-04		Biegeversuch	
Multistegplatte 5X-32	800x150x32	434 g	Polycarbonat
4-Punkt-Biegeversuch	5 mm/min	Zeit-Wege-Messung	
12.10.2006	3 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte	



Lastverformungsdiagramm B-04 / Multistegplatte 5X-32



B-04

Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse

1	Steigungsgradient m	dP/dw	0,201 kN/cm
2	Durchbiegungsfaktor k	$= 23/1296$	
3	Gesamtsteifigkeit B	$= m \cdot k \cdot l^3$	1505,710 kNm ²

Referenz Vollplatte (blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)

Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)

Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]

Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse,
Schubverformung eingeschlossenVergleichskennwerte Steifigkeit

4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	$B_0 = B / b$	1004 Nm ² /m
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	$= E \cdot I_y$	1196 Nm ² /m
5a	Anteil Schubverformung	$\gamma = 1 - B_0 / E \cdot I_y$	16%
5b	Schubmodul G Kernschicht	$= \gamma \cdot m_l / 6db$	0,336 kN/cm ²
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	$B_0 = E_0 \cdot I_0 \cdot d^2 / 2$	1105 Nm ² /m
7	Äquivalenter E-Modul $E_{\text{Äq}}$	$E_{\text{Äq}} = B_0 / I_y$	37 kN/cm ²
7a	Vergleich: Vollplatte PMMA	E	230 kN/cm ²
8	Trägheitsmoment absolut, geschätzt	I_y	7,800 cm ⁴
8a	Vergleich: Vollplatte	$I_0 = h^3 \cdot b / 12$	40,960 cm ⁴

breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=15 cm

Berechnet mit I aus tatsächlichen Querschnitt und E des Werkstoffs
Schubverformung des Kerns
Berechnung nach [kle05]

Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]

16% Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
Tatsächlicher E-Modul des Materials nach Angabe Hersteller19% Trägheitsmoment I_y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
Trägheitsmoment I_y bezogen auf einen Referenz-VollquerschnittLeichtbaukennzahlen

9	Gewicht Platte	absolut	434 g	9%	Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
9a	Vergleich: Vollplatte PMMA		4608 g		Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 1,2 g/cm ³
10	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	$\beta = B / G$	3,47	170%	Biegesteifigkeit pro Gewicht
10a	Vergleich: Vollplatte PMMA		2,04		Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

B-04

Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,001	0,020	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,007
0,217	0,030	0,041	0,030	0,238	0,020	0,165	0,027
0,579	0,050	0,525	0,050	0,483	0,040	0,529	0,047
1,027	0,060	1,141	0,060	1,207	0,060	1,125	0,060
1,428	0,070	1,789	0,090	2,005	0,080	1,741	0,080
1,923	0,080	2,338	0,100	2,786	0,100	2,349	0,093
2,425	0,100	3,064	0,130	3,599	0,120	3,029	0,117
3,173	0,110	3,878	0,140	4,410	0,140	3,820	0,130
4,065	0,130	4,633	0,150	5,359	0,160	4,685	0,147
5,015	0,150	5,163	0,160	6,280	0,180	5,486	0,163
5,975	0,170	5,747	0,180	7,248	0,200	6,323	0,183
6,918	0,190	6,696	0,200	8,189	0,220	7,268	0,203
7,867	0,210	7,632	0,220	9,107	0,240	8,202	0,223
8,798	0,230	8,568	0,240	10,069	0,270	9,145	0,247
9,722	0,240	9,502	0,260	10,996	0,290	10,073	0,263
10,652	0,270	10,432	0,280	11,929	0,310	11,004	0,287
11,581	0,280	11,353	0,300	12,883	0,330	11,939	0,303
12,500	0,300	12,228	0,320	13,800	0,350	12,842	0,323
13,438	0,320	13,186	0,340	14,746	0,370	13,790	0,343
14,384	0,340	14,132	0,360	15,714	0,390	14,743	0,363
15,292	0,360	15,093	0,380	16,668	0,420	15,684	0,387
16,239	0,370	16,052	0,400	17,616	0,440	16,636	0,403
17,174	0,390	16,973	0,420	18,574	0,450	17,573	0,420
18,117	0,410	17,935	0,440	19,516	0,480	18,522	0,443
19,072	0,430	18,888	0,460	20,472	0,500	19,477	0,463
20,016	0,450	19,837	0,480	21,430	0,520	20,427	0,483
20,966	0,460	20,780	0,500	22,361	0,540	21,369	0,500
21,919	0,480	21,735	0,520	23,304	0,560	22,319	0,520
22,870	0,490	22,702	0,530	24,269	0,580	23,280	0,533
23,823	0,510	23,669	0,560	25,208	0,600	24,233	0,557
24,776	0,530	24,626	0,580	26,148	0,620	25,183	0,577
25,719	0,550	25,567	0,590	27,086	0,640	26,124	0,593
26,659	0,570	26,515	0,620	28,023	0,660	27,066	0,617
27,604	0,580	27,464	0,630	28,939	0,680	28,002	0,630
28,551	0,600	28,410	0,650	29,873	0,700	28,944	0,650
29,485	0,610	29,353	0,670	30,797	0,720	29,878	0,667
30,421	0,630	30,295	0,690	31,730	0,740	30,815	0,687
31,354	0,650	31,233	0,710	32,646	0,760	31,744	0,707
32,286	0,660	32,179	0,730	33,577	0,780	32,680	0,723
33,212	0,670	33,145	0,740	34,519	0,800	33,625	0,737
34,150	0,690	34,094	0,760	35,415	0,820	34,553	0,757
35,052	0,700	35,009	0,780	36,330	0,840	35,464	0,773
35,964	0,710	35,948	0,800	37,159	0,860	36,357	0,790
36,868	0,720	36,891	0,820	37,926	0,880	37,228	0,807
37,759	0,730	37,860	0,840	38,642	0,900	38,087	0,823
38,657	0,730	38,812	0,860	39,298	0,920	38,922	0,837
39,327	0,740	39,701	0,870	39,733	0,940	39,587	0,850
39,991	0,740	40,556	0,890	40,164	0,950	40,237	0,860

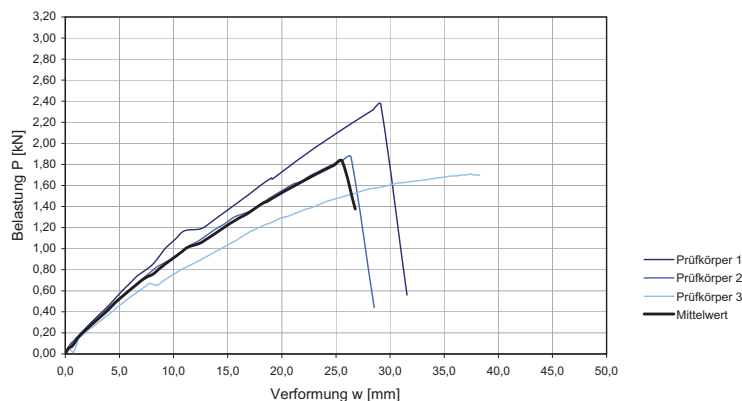
Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht.

B-05		Biegeversuch	
Wellenstegplatte "Scobalit ILE 30"	800x210x30	825 g	GFK
4-Punkt-Biegeversuch über 750 mm	5 mm/min	Zeit-Wege-Messung	
12.10.2006	3 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte	



Prüfkörper 3 wurde umgekehrt belastet!

Lastverformungsdiagramm B-05 / GFK-Wellenstegplatte



B-05

Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse

1	Steigungsgradient m	dP/dw	0,934 kN/cm
2	Durchbiegungsfaktor k	$= 23/1296$	
3	Gesamtsteifigkeit B	$= m \cdot k^3$	6990,754 kNm ²

Referenz Vollplatte (blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)

Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)

Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]

Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse, Schubverformung eingeschlossen

Vergleichskennwerte Steifigkeit

4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	$B_0 = B / b$	3329 Nm ² /m
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	$= E \cdot I_x$	5250 Nm ² /m
5a	Anteil Schubverformung	$\gamma = 1 - B_0 / E \cdot I_x$	37%
5b	Schubmodul G Kernschicht	$= \gamma \cdot m / 6db$	0,533 kN/cm ²
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	$B_0 = E_0 \cdot I_0 \cdot d^2 / 2$	4874 Nm ² /m
7	Äquivalentes E-Modul $E_{\text{Äq}}$	$E_{\text{Äq}} = B / I_x$	148 kN/cm ²
7a	Vergleich: Vollplatte PMMA	E	800 kN/cm ²
8	Trägheitsmoment absolut, geschätzt	I_y	13,780 cm ⁴
8a	Vergleich: Vollplatte	$I_y = h^3 \cdot b / 12$	47,250 cm ⁴

breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=21 cm

Berechnet mit I aus tatsächlichen Querschnitt und E des Werkstoffs
Schubverformung des Kerns
Berechnung nach [kle05]

Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]

18% Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
Tatsächlicher E-Modul des Materials nach Angabe Hersteller

29% Trägheitsmoment I_y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
Trägheitsmoment I_y bezogen auf einen Referenz-Vollquerschnitt

Leichtbaukennzahlen

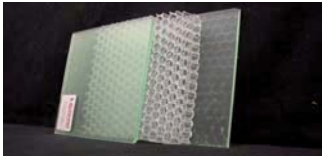
9	Gewicht Platte	absolut	825 g	7%	Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
9a	Vergleich: Vollplatte GFK		11088 g		Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 2,2 g/cm ³
10	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	$\beta = B / G$	8,47	249%	Biegesteifigkeit pro Gewicht
10a	Vergleich: Vollplatte GFK		3,41		Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

B-05

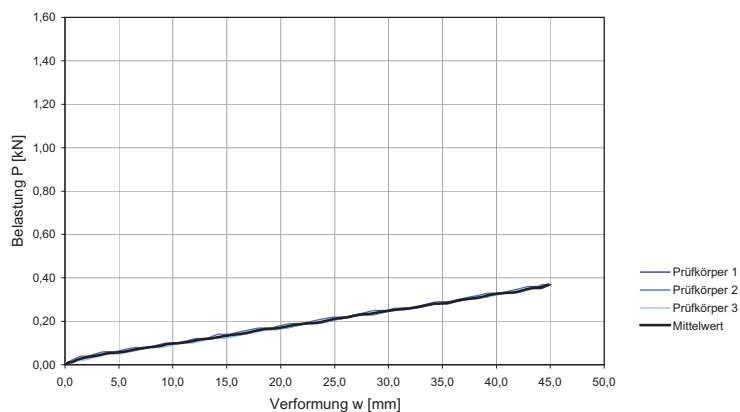
Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000
0,318	0,060	0,226	0,050	0,349	0,050	0,298	0,053
0,753	0,120	0,495	0,100	0,764	0,010	0,671	0,077
1,465	0,200	1,095	0,150	1,249	0,150	1,269	0,167
2,308	0,290	1,885	0,230	2,174	0,230	2,122	0,250
3,182	0,380	2,711	0,310	3,094	0,300	2,995	0,330
4,100	0,470	3,562	0,390	4,038	0,380	3,900	0,413
4,991	0,570	4,411	0,480	4,967	0,460	4,790	0,503
5,868	0,660	5,221	0,550	5,904	0,530	5,664	0,580
6,741	0,750	6,035	0,620	6,823	0,600	6,533	0,657
7,621	0,810	6,870	0,690	7,762	0,670	7,417	0,723
8,240	0,870	7,676	0,760	8,477	0,650	8,131	0,760
8,693	0,930	8,508	0,830	9,285	0,710	8,828	0,823
9,315	1,010	9,628	0,890	10,062	0,760	9,668	0,887
10,159	1,090	10,472	0,950	10,864	0,810	10,498	0,950
11,012	1,170	11,336	1,020	11,628	0,850	11,325	1,013
12,531	1,190	12,260	1,070	12,407	0,890	12,399	1,050
13,562	1,260	13,102	1,130	13,206	0,930	13,290	1,107
14,516	1,330	13,934	1,190	13,884	0,970	14,111	1,163
15,443	1,400	14,770	1,240	14,542	1,010	14,918	1,217
16,367	1,470	15,604	1,300	15,214	1,050	15,728	1,273
17,269	1,540	16,927	1,350	15,815	1,080	16,670	1,323
18,154	1,610	17,746	1,400	16,421	1,120	17,440	1,377
19,049	1,670	18,551	1,460	17,049	1,160	18,216	1,430
19,120	1,660	19,355	1,510	17,667	1,190	18,714	1,453
19,904	1,720	20,168	1,560	18,305	1,220	19,459	1,500
20,691	1,780	20,968	1,610	19,092	1,250	20,250	1,547
21,484	1,840	21,794	1,640	19,864	1,290	21,047	1,590
22,265	1,900	22,562	1,690	20,617	1,310	21,815	1,633
23,058	1,960	23,338	1,730	21,364	1,340	22,587	1,677
23,833	2,010	24,112	1,770	22,073	1,370	23,339	1,717
24,623	2,070	24,888	1,810	22,781	1,390	24,097	1,757
25,400	2,120	25,642	1,840	23,482	1,420	24,841	1,793
26,182	2,170	26,394	1,870	24,181	1,450	25,585	1,830
26,933	2,220	28,539	0,440	24,871	1,470	26,781	1,377
27,687	2,270	0,000	0,000	25,550	1,490	17,746	1,253
28,441	2,320	0,000	0,000	26,204	1,510	18,215	1,277
29,147	2,370	0,000	0,000	26,859	1,530	18,669	1,300
31,557	0,560	0,000	0,000	27,518	1,550	19,692	0,703
0,000	0,000	0,000	0,000	28,207	1,570	9,402	0,523
0,000	0,000	0,000	0,000	28,999	1,580	9,666	0,527
0,000	0,000	0,000	0,000	29,815	1,600	9,938	0,533
0,000	0,000	0,000	0,000	30,609	1,620	10,203	0,540
0,000	0,000	0,000	0,000	31,419	1,630	10,473	0,543
0,000	0,000	0,000	0,000	32,193	1,640	10,731	0,547
0,000	0,000	0,000	0,000	32,950	1,650	10,983	0,550
0,000	0,000	0,000	0,000	33,663	1,660	11,221	0,553
0,000	0,000	0,000	0,000	34,337	1,670	11,446	0,557
0,000	0,000	0,000	0,000	34,987	1,680	11,662	0,560
0,000	0,000	0,000	0,000	35,611	1,690	11,870	0,563
0,000	0,000	0,000	0,000	36,153	1,690	12,051	0,563
0,000	0,000	0,000	0,000	36,589	1,700	12,196	0,567
0,000	0,000	0,000	0,000	37,024	1,700	12,341	0,567
0,000	0,000	0,000	0,000	37,416	1,710	12,472	0,570
0,000	0,000	0,000	0,000	37,740	1,700	12,580	0,567
0,000	0,000	0,000	0,000	38,051	1,700	12,684	0,567
0,000	0,000	0,000	0,000	38,280	1,700	12,760	0,567

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht.

B-06		Biegeversuch		
Tubuswabenplatte "Airboard"		800x150x20	432 g Polycarbonat	
4-Punkt-Biegeversuch		5 mm/min	Zeit-Wege-Messung	
16.04.2007		3 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte	

Lastverformungsdiagramm B-06 / Tubuswabenplatte



B-06


Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse			Referenz Vollplatte	(blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)
1	Steigungsgradient m	dP/dw	0,076 kN/cm	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Durchbiegungsfaktor k	$= 23/1296$		Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]
3	Gesamtsteifigkeit B	$= m \cdot k \cdot l^3$	568,321 kNcm ²	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse, Schubverformung eingeschlossen
Vergleichskennwerte Steifigkeit				
4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	$B_s = B / b$	379 Nm ² /m	breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=15 cm
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	$= E \cdot I$	414 Nm ² /m	Berechnet mit I aus tatsächlichen Querschnitt und E des Werkstoffs
5a	Anteil Schubverformung	$g = 1 - B_s / E \cdot I$	8%	Schubverformung des Kerns
5b	Schubmodul G Kernschicht	$= m \cdot l / g \cdot 6db$	0,392 kN/cm ²	Berechnung nach [kle05]
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	$B_s = E_s \cdot I_s \cdot d^2 / 2$	415 Nm ² /m	Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]
7	Äquivalenter E-Modul E _{Äq}	$E_{Äq} = B / I$	57 kN/cm ²	25% Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
7a	Vergleich: Vollplatte PMMA	E	230 kN/cm ²	Tatsächlicher E-Modul des Materials nach Angabe Hersteller
8	Trägheitsmoment absolut, geschätzt	I_y	2,700 cm ⁴	28% Trägheitsmoment I _y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
8a	Vergleich: Vollplatte	$I_y = h^3 \cdot b / 12$	10,000 cm ⁴	Trägheitsmoment I _y bezogen auf einen Referenz-Vollquerschnitt
Leichtbaukennzahlen				
9	Gewicht Platte	absolut	432 g	15% Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
9a	Vergleich: Vollplatte GFK		2880 g	Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 2,2 g/cm ³
10	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	$b = B / G$	1,32	165% Biegesteifigkeit pro Gewicht
10a	Vergleich: Vollplatte GFK		0,80	Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

B-06

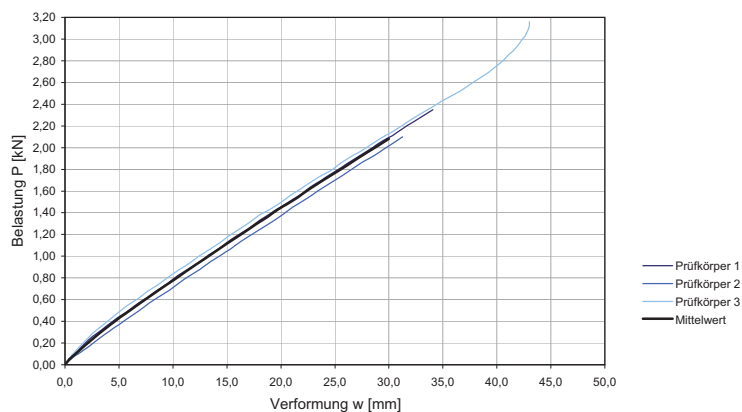
Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,166	0,000	0,064	0,000	0,053	0,010	0,094	0,003
0,401	0,010	0,288	0,010	0,341	0,010	0,343	0,010
0,722	0,010	0,592	0,020	0,739	0,010	0,684	0,013
1,176	0,020	1,019	0,030	1,196	0,020	1,130	0,023
1,686	0,030	1,509	0,040	1,739	0,020	1,645	0,030
2,288	0,040	2,084	0,040	2,422	0,030	2,264	0,037
3,035	0,040	2,810	0,050	3,276	0,040	3,040	0,043
3,950	0,050	3,712	0,060	4,236	0,050	3,966	0,053
4,910	0,060	4,593	0,060	5,221	0,050	4,908	0,057
5,877	0,060	5,553	0,070	6,120	0,060	5,850	0,063
6,834	0,070	6,508	0,080	7,090	0,070	6,810	0,073
7,814	0,080	7,497	0,080	8,039	0,080	7,783	0,080
8,828	0,090	8,482	0,090	9,011	0,080	8,773	0,087
9,345	0,095	9,442	0,100	9,980	0,090	9,589	0,095
10,672	0,100	10,328	0,100	10,945	0,100	10,648	0,100
11,656	0,110	11,278	0,110	11,817	0,100	11,584	0,107
12,629	0,120	12,231	0,120	12,767	0,110	12,542	0,117
13,586	0,120	13,169	0,120	13,726	0,120	13,493	0,120
14,571	0,130	14,126	0,140	14,698	0,120	14,465	0,130
15,534	0,140	15,090	0,140	15,649	0,130	15,424	0,137
16,509	0,140	16,076	0,150	16,624	0,140	16,403	0,143
17,522	0,150	17,048	0,160	17,607	0,150	17,392	0,153
18,520	0,160	18,000	0,170	18,580	0,160	18,367	0,163
19,506	0,170	18,976	0,170	19,561	0,160	19,348	0,167
20,494	0,170	19,952	0,180	20,524	0,170	20,323	0,173
21,511	0,180	20,953	0,190	21,529	0,180	21,331	0,183
22,489	0,190	21,912	0,190	22,521	0,190	22,307	0,190
23,498	0,190	22,887	0,200	23,485	0,190	23,290	0,193
24,489	0,200	23,869	0,210	24,466	0,200	24,274	0,203
25,530	0,210	24,871	0,220	25,445	0,210	25,282	0,213
26,501	0,220	25,857	0,220	26,432	0,220	26,263	0,220
27,481	0,230	26,823	0,230	27,428	0,230	27,244	0,230
28,477	0,230	27,803	0,240	28,377	0,230	28,219	0,233
29,468	0,240	28,786	0,250	29,379	0,240	29,211	0,243
30,480	0,250	29,745	0,250	30,346	0,250	30,190	0,250
31,453	0,260	30,710	0,260	31,297	0,250	31,153	0,257
32,422	0,260	31,676	0,260	32,252	0,260	32,117	0,260
33,423	0,270	32,668	0,270	33,226	0,270	33,105	0,270
34,391	0,280	33,605	0,280	34,201	0,280	34,066	0,280
35,350	0,280	34,544	0,290	35,134	0,280	35,009	0,283
36,281	0,290	35,466	0,290	36,064	0,290	35,937	0,290
37,258	0,300	36,413	0,300	37,029	0,300	36,900	0,300
38,177	0,310	37,386	0,310	37,976	0,300	37,846	0,307
39,043	0,310	38,344	0,320	38,937	0,310	38,775	0,313
39,543	0,320	39,289	0,330	39,887	0,320	39,573	0,323
40,586	0,330	40,259	0,330	40,835	0,330	40,560	0,330
41,608	0,330	41,213	0,340	41,803	0,330	41,541	0,333
42,534	0,340	42,150	0,350	42,691	0,340	42,458	0,343
43,449	0,350	43,019	0,360	43,426	0,350	43,298	0,353
44,112	0,350	43,726	0,360	44,072	0,360	43,970	0,357
44,673	0,360	44,335	0,370	44,556	0,360	44,521	0,363
45,046	0,370	44,810	0,370	44,683	0,370	44,846	0,370

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht.

B-07		Biegeversuch		
3D-Wabenplatte "clear pep"		800x150x40	1100 g	
4-Punkt-Biegeversuch über 750 mm		5 mm/min	Zeit-Wege-Messung	
16.10.2007		3 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte	

Lastverformungsdiagramm B-07 / 3D-Wabenplatte

**B-07**

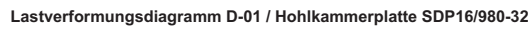
<u>Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse</u>			Referenz Vollplatte	(blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)
1	Steigungsgradient m	dP/dw	0,661 kN/cm	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Durchbiegungsfaktor k	$= 23/1296$		Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]
3	Gesamtsteifigkeit B	$= m \cdot k \cdot l^3$	4948,122 kNcm ²	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse, Schubverformung eingeschlossen
<u>Vergleichskennwerte Steifigkeit</u>				
4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	$B_b = B / b$	3299 Nm ² /m	breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=15 cm
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	$= E \cdot I_y$	3723 Nm ² /m	Berechnet mit I aus tatsächlichen Querschnitt und E des Werkstoffs
5a	Anteil Schubverformung	$\gamma = 1 - B_b / E \cdot I_y$	11%	Schubverformung des Kerns
5b	Schubmodul G	$= m \cdot l / \gamma \cdot 6db$	1,272 kN/cm ²	Berechnung nach [kle05]
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	$B_s = E_b \cdot I_b \cdot d^2 / 2$	3321 Nm ² /m	Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]
7	Äquivalenter E-Modul E _{äq}	$E_{äq} = B / I_y$	62 kN/cm ²	27% Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
7a	Vergleich: Vollplatte PMMA	E	230 kN/cm ²	Tatsächlicher E-Modul des Materials nach Angabe Hersteller
8	Trägheitsmoment absolut, geschätzt	I_y	24,280 cm ⁴	30% Trägheitsmoment I _y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
8a	Vergleich: Vollplatte	$I_y = h^3 b / 12$	80,000 cm ⁴	Trägheitsmoment I _y bezogen auf einen Referenz-Vollquerschnitt
<u>Leichtbaukennzahlen</u>				
9	Gewicht Platte	absolut	1100 g	19% Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
9a	Vergleich: Vollplatte PC		5760 g	Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 1,2 g/cm ³
10	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	$b = B / G$	4,50	141% Biegesteifigkeit pro Gewicht
10a	Vergleich: Vollplatte GFK		3,19	Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

B-07

Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000
0,418	0,060	0,769	0,070	0,188	0,030	0,458	0,053
0,882	0,100	1,362	0,110	0,381	0,060	0,875	0,090
1,488	0,160	2,246	0,170	0,751	0,100	1,495	0,143
2,201	0,230	3,175	0,240	1,259	0,160	2,212	0,210
2,980	0,290	4,105	0,310	1,891	0,220	2,992	0,273
3,865	0,360	5,036	0,370	2,588	0,290	3,829	0,340
4,813	0,430	5,977	0,440	3,303	0,350	4,697	0,407
5,748	0,490	6,900	0,500	4,062	0,410	5,570	0,467
6,685	0,560	7,838	0,570	4,913	0,480	6,479	0,537
7,650	0,620	8,772	0,630	5,844	0,550	7,422	0,600
8,591	0,690	9,700	0,690	6,771	0,610	8,354	0,663
9,540	0,750	10,654	0,760	7,696	0,680	9,297	0,730
10,461	0,820	11,583	0,820	8,646	0,740	10,230	0,793
11,396	0,880	12,525	0,880	9,590	0,810	11,170	0,857
12,354	0,940	13,487	0,950	10,521	0,870	12,121	0,920
13,291	1,010	14,434	1,010	11,461	0,930	13,062	0,983
14,236	1,070	15,373	1,070	12,397	1,000	14,002	1,047
15,174	1,140	16,334	1,140	13,337	1,060	14,948	1,113
16,149	1,200	17,314	1,200	14,264	1,120	15,909	1,173
17,094	1,260	18,259	1,260	15,215	1,190	16,856	1,237
18,033	1,330	19,198	1,320	16,154	1,250	17,795	1,300
18,967	1,390	20,127	1,380	17,088	1,310	18,727	1,360
19,943	1,450	21,091	1,450	18,025	1,380	19,686	1,427
20,906	1,510	22,046	1,510	18,966	1,430	20,639	1,483
21,842	1,570	22,977	1,570	19,929	1,490	21,582	1,543
22,779	1,640	23,899	1,630	20,867	1,560	22,515	1,610
23,749	1,700	24,846	1,690	21,805	1,620	23,467	1,670
24,701	1,760	25,778	1,750	22,742	1,680	24,407	1,730
25,643	1,820	26,696	1,810	23,695	1,740	25,344	1,790
26,591	1,880	27,605	1,870	24,649	1,790	26,282	1,847
27,529	1,940	28,521	1,920	25,592	1,860	27,214	1,907
28,471	2,000	29,450	1,980	26,528	1,920	28,150	1,967
29,410	2,060	30,366	2,040	27,452	1,970	29,076	2,023
30,330	2,110	31,255	2,100	28,393	2,030	29,992	2,080
31,214	2,170	32,166	2,150	29,313	2,090	30,897	2,137
32,168	2,230	33,099	2,210	30,233	2,140	31,833	2,193
33,117	2,290	34,036	2,270	31,165	2,200	32,773	2,253
34,068	2,350	34,971	2,320	32,099	2,260	33,712	2,310
34,975	2,400	35,842	2,380	33,061	2,320	34,626	2,367
35,914	2,460	36,647	2,430	33,960	2,370	35,507	2,420
36,784	2,510	37,415	2,490	34,902	2,430	36,367	2,477
37,599	2,570	38,058	2,540	35,811	2,480	37,156	2,530
38,352	2,620	38,467	2,590	36,745	2,530	37,855	2,580
39,048	2,680	38,753	2,640	37,620	2,590	38,474	2,637
39,649	2,730	38,995	2,700	38,419	2,640	39,021	2,690
40,123	2,780	39,121	2,750	39,198	2,690	39,480	2,740
40,582	2,830	39,123	2,800	39,932	2,750	39,879	2,793
41,006	2,880	39,121	2,850	40,569	2,800	40,232	2,843
41,359	2,930	39,121	2,900	41,022	2,850	40,501	2,893
41,719	2,980	39,117	2,950	41,500	2,890	40,778	2,940
41,918	3,030	39,124	3,000	41,949	2,940	40,997	2,990
41,965	3,070	39,115	3,040	42,302	2,990	41,127	3,033
41,959	3,120	39,123	3,090	42,622	3,030	41,234	3,080
41,966	3,160	39,122	3,130	42,879	3,080	41,322	3,123
41,957	3,210	39,120	3,180	43,016	3,120	41,364	3,170
41,957	3,250	39,121	3,210	43,018	3,160	41,365	3,207
41,950	3,290	39,122	3,260	43,015	3,210	41,362	3,253
41,953	3,330	39,122	3,300	43,013	3,240	41,363	3,290
41,960	3,370	39,122	3,330	43,014	3,280	41,365	3,327

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht.




D-01

D-01

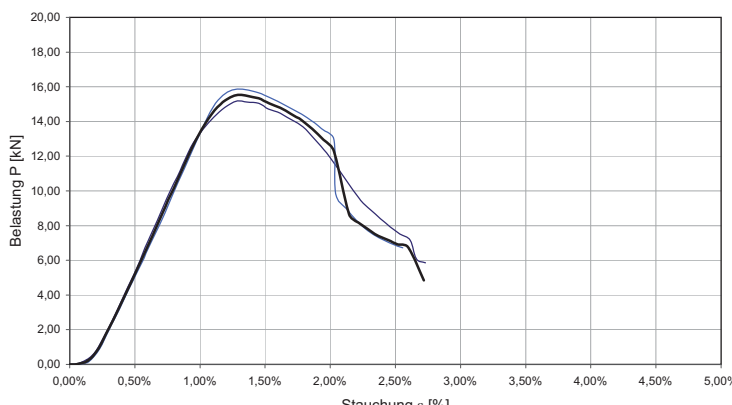
Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,100%	0,000	0,000%	0,010	0,002%	0,010	0,034%	0,007
0,170%	0,120	0,038%	0,010	0,066%	0,040	0,091%	0,057
0,175%	0,210	0,085%	0,010	0,136%	0,130	0,132%	0,117
0,244%	0,300	0,141%	0,010	0,220%	0,280	0,201%	0,197
0,324%	0,580	0,196%	0,080	0,295%	0,390	0,272%	0,350
0,398%	0,840	0,263%	0,220	0,381%	0,620	0,347%	0,560
0,480%	1,190	0,327%	0,350	0,455%	0,820	0,421%	0,787
0,556%	1,330	0,403%	0,570	0,540%	0,860	0,500%	0,920
0,642%	1,400	0,475%	0,680	0,616%	0,850	0,578%	0,977
0,716%	1,750	0,560%	0,780	0,700%	1,090	0,658%	1,207
0,798%	2,360	0,631%	0,850	0,772%	1,580	0,734%	1,597
0,868%	2,970	0,719%	1,170	0,857%	2,490	0,815%	2,210
0,954%	3,940	0,798%	1,700	0,936%	3,380	0,896%	3,007
1,031%	4,840	0,881%	2,530	1,023%	4,430	0,978%	3,933
1,120%	5,940	0,956%	3,460	1,104%	5,380	1,060%	4,927
1,197%	6,880	1,044%	4,430	1,195%	6,480	1,145%	5,930
1,289%	8,030	1,118%	5,410	1,276%	7,430	1,228%	6,957
1,370%	9,030	1,201%	6,400	1,362%	8,460	1,311%	7,963
1,461%	10,090	1,282%	7,390	1,442%	9,370	1,395%	8,950
1,543%	11,050	1,368%	8,440	1,530%	10,420	1,480%	9,970
1,634%	11,970	1,450%	9,430	1,610%	11,310	1,564%	10,903
1,719%	12,690	1,536%	10,410	1,693%	12,230	1,649%	11,777
1,813%	12,950	1,617%	11,330	1,768%	12,880	1,733%	12,387
1,894%	12,220	1,708%	12,280	1,846%	12,130	1,816%	12,210
1,987%	11,420	1,792%	13,130	1,916%	10,860	1,898%	11,803
2,063%	10,720	1,877%	13,260	1,992%	9,940	1,977%	11,307
2,152%	10,140	1,956%	11,200	2,063%	9,220	2,057%	10,187
2,225%	9,540	2,042%	9,830	2,145%	8,660	2,137%	9,343
2,309%	8,920	2,122%	8,990	2,216%	8,180	2,216%	8,697
2,384%	8,400	2,195%	8,360	2,294%	7,780	2,291%	8,180
2,461%	7,920	2,263%	7,860	2,365%	7,430	2,363%	7,737
2,535%	7,510	2,331%	7,480	2,445%	7,170	2,437%	7,387
2,613%	7,170	2,407%	7,190	2,516%	6,920	2,512%	7,093
2,661%	6,070	2,481%	6,930	2,600%	6,720	2,581%	6,573
2,730%	5,850	2,557%	6,720	2,719%	4,850	2,669%	5,807
2,811%	5,850	2,633%	6,480	2,807%	5,280	2,750%	5,870
2,892%	5,830	2,709%	6,300	2,880%	5,360	2,827%	5,830
2,974%	5,800	2,784%	6,130	2,964%	5,410	2,907%	5,780
3,059%	5,760	2,863%	5,200	3,036%	5,400	2,986%	5,453
3,137%	5,730	2,941%	5,220	3,123%	5,400	3,067%	5,450
3,222%	5,690	3,020%	5,200	3,195%	5,360	3,146%	5,417
3,302%	5,640	3,100%	5,150	3,281%	5,340	3,228%	5,377
3,386%	5,580	3,204%	5,110	3,359%	5,220	3,316%	5,303
3,463%	5,400	3,290%	5,040	3,442%	5,180	3,398%	5,207
3,544%	5,280	3,374%	4,990	3,517%	5,130	3,478%	5,133
3,626%	5,250	3,448%	4,910	3,600%	5,080	3,558%	5,080
3,706%	5,200	3,530%	4,840	3,680%	4,960	3,639%	5,000
3,794%	5,150	3,607%	4,760	3,766%	4,910	3,722%	4,940
3,872%	5,080	3,690%	4,680	3,842%	4,800	3,801%	4,853
3,952%	5,010	3,767%	4,590	3,928%	4,750	3,882%	4,783
4,034%	4,910	3,849%	4,510	4,004%	4,690	3,962%	4,703
4,114%	4,830	3,929%	4,430	4,088%	4,560	4,043%	4,607
4,178%	4,540	4,007%	4,350	4,160%	4,500	4,115%	4,463
4,256%	4,470	4,091%	4,250	4,244%	4,460	4,197%	4,393
4,337%	4,390	4,171%	4,190	4,326%	4,340	4,278%	4,307
4,420%	4,320	4,248%	4,110	4,411%	4,290	4,359%	4,240
4,502%	4,250	4,333%	4,050	4,489%	4,240	4,441%	4,180
4,584%	4,180			4,576%	4,060		
4,661%	4,090			4,658%	4,030		
4,746%	4,020			4,740%	4,000		
4,788%	3,600			4,835%	3,640		

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht

D-02		Druckversuch		
Einfachstegplatte SDP16-64, PMMA		400x200x16	430 g PMMA	
Zentrischer Druckversuch		5 mm/min	Zeit-Wege-Messung	
21.10.2006		2 Prüfkörper	2 Aufnehmer seitlich	

Lastverformungsdiagramm D-02 / Hohlkammerplatte SDP16-64



Belastung P [kN]

Stauchung ε [%]

— Prüfkörper 1
— Prüfkörper 2
— Mittelwert

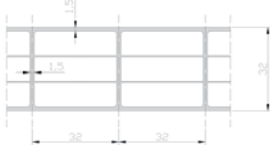
D-02				
Ermittlung der Drucksteifigkeit				Referenz Vollplatte
1	Drucksteifigkeit D	$D = dP/d\epsilon$	1636,940 kN	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Querschnitt volle Fläche	A	32 cm ²	Querkontraktion bleibt unberücksichtigt
3	Äquivalenter Druckmodul	$E_{\text{eq}} = D / A$	51,154 kN/cm ²	Außenabmessungen Querschnitt
4	Vergleich: Vollplatte PMMA		330	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse
5	Maximallast	P_{max}	15,5 kN	Tatsächlicher E-Modul des Materials
6	Breitennormierte Drucksteifigkeit	D_0	10231 kN/m	Maximale Last vor dem Ausknicken / Versagen
7	Drucksteifigkeit nach Sandwichtheorie	$D = 2 E_c t_c b$	13200 kN/m	Wert aus 1 auf Referenzbreite von 1 Meter bezogen
Nur die Deckschichten werden für den Lastabtrag angesetzt [kle05]				
Leichtbaukennzahlen				
8	Gewicht Prüfkörper	absolut	430 g	28%
9	Vergleich: Vollplatte	1,2 g/cm ³	1536 g	Durchschnittsgewicht Prüfkörper
10	Verhältnis Drucksteifigkeit zu Gewicht	$\delta = D / G$	3,81 kN/g	Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts
11	Vergleich: Vollplatte PMMA		6,88	Drucksteifigkeit pro Gewicht
				Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

D-02

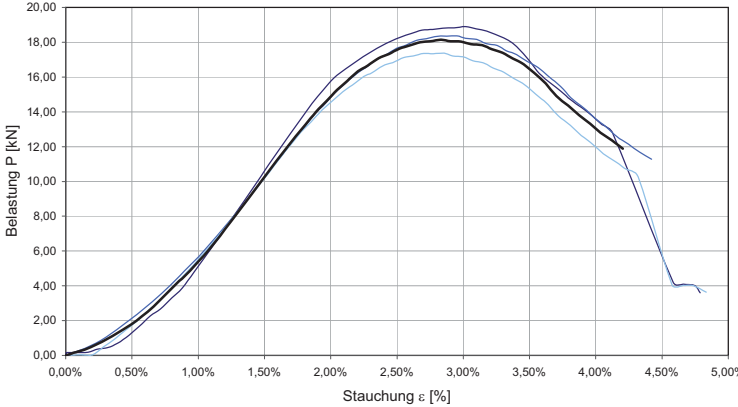
Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000%	0,000	0,000%	0,000	0,000%	0,000
0,045%	0,010	0,072%	0,020	0,059%	0,015
0,131%	0,270	0,146%	0,170	0,139%	0,220
0,201%	0,770	0,227%	0,890	0,214%	0,830
0,282%	1,880	0,304%	2,020	0,293%	1,950
0,355%	2,990	0,387%	3,270	0,371%	3,130
0,439%	4,350	0,464%	4,500	0,451%	4,425
0,514%	5,560	0,551%	5,830	0,532%	5,695
0,602%	7,100	0,624%	7,010	0,613%	7,055
0,678%	8,380	0,711%	8,400	0,695%	8,390
0,766%	9,900	0,790%	9,770	0,778%	9,835
0,846%	11,150	0,877%	11,220	0,861%	11,185
0,930%	12,530	0,954%	12,540	0,942%	12,535
1,011%	13,420	1,037%	13,920	1,024%	13,670
1,103%	14,240	1,119%	15,050	1,111%	14,645
1,190%	14,810	1,205%	15,660	1,197%	15,235
1,281%	15,180	1,285%	15,880	1,283%	15,530
1,361%	15,120	1,368%	15,810	1,364%	15,465
1,452%	15,040	1,451%	15,650	1,451%	15,345
1,527%	14,720	1,535%	15,370	1,531%	15,045
1,616%	14,480	1,617%	15,090	1,616%	14,785
1,696%	14,130	1,700%	14,750	1,698%	14,440
1,783%	13,730	1,780%	14,420	1,781%	14,075
1,862%	13,130	1,864%	14,000	1,863%	13,565
1,950%	12,380	1,946%	13,520	1,948%	12,950
2,029%	11,600	2,029%	12,930	2,029%	12,265
2,225%	9,540	2,042%	9,830	2,145%	8,660
2,309%	8,920	2,122%	8,990	2,216%	8,180
2,384%	8,400	2,195%	8,360	2,294%	7,780
2,461%	7,920	2,263%	7,860	2,365%	7,430
2,535%	7,510	2,331%	7,480	2,445%	7,170
2,613%	7,170	2,407%	7,190	2,516%	6,920
2,661%	6,070	2,481%	6,930	2,600%	6,720
2,730%	5,850	2,557%	6,720	2,719%	4,850

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht

D-03		Druckversuch		
Mehrfachstegplatte S4P-32-980/32 PMMA schlagzäh	400x160x32	300 g	PMMA	
Zentrischer Druckversuch	5 mm/min	Zeit-Wege-Messung		
21.10.2006	3 Prüfkörper	1 Aufnehmer seitlich		

Lastverformungsdiagramm D-03 / Mehrfachstegplatte S4P-32/980-32



— Prüfkörper 1
— Prüfkörper 2
— Prüfkörper 3
— Mittelwert

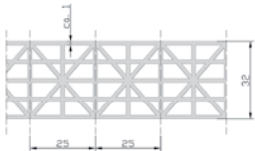
D-03					
Ermittlung der Drucksteifigkeit			Referenz Vollplatte		
1	Drucksteifigkeit D	$D = dP/dε$	934,610 kN	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)	
2	Querschnitt volle Fläche	A	51,2 cm²	Querkontraktion bleibt unberücksichtigt	
3	Äquivalenter Druckmodul	$E_{eq} = D / A$	18,254 kN/cm²	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse	
4	Vergleich: Vollplatte PMMA		235	Tatsächlicher E-Modul des Materials	
5	Maximallast	P_{max}	18,1 kN	Maximale Last vor dem Ausknicken / Versagen	
6	Breitennormierte Drucksteifigkeit	D_b	5841 kN/m	Wert aus 1 auf Referenzbreite von 1 Meter bezogen	
7	Drucksteifigkeit nach Sandwichtheorie	$D = 2 E_c t_c b$	7050 kN/m	Nur die Deckschichten werden für den Lastabtrag angesetzt [kle05]	
Leichtbaukennzahlen					
8	Gewicht Prüfkörper	absolut	300 g	12%	Durchschnittsgewicht Prüfkörper
9	Vergleich: Vollplatte	1,2 g/cm³	2458 g		Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts
10	Verhältnis Drucksteifigkeit zu Gewicht	$δ = D / G$	3,12 kN/g	64%	Drucksteifigkeit pro Gewicht
11	Vergleich: Vollplatte PMMA		4,90		Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

D-03

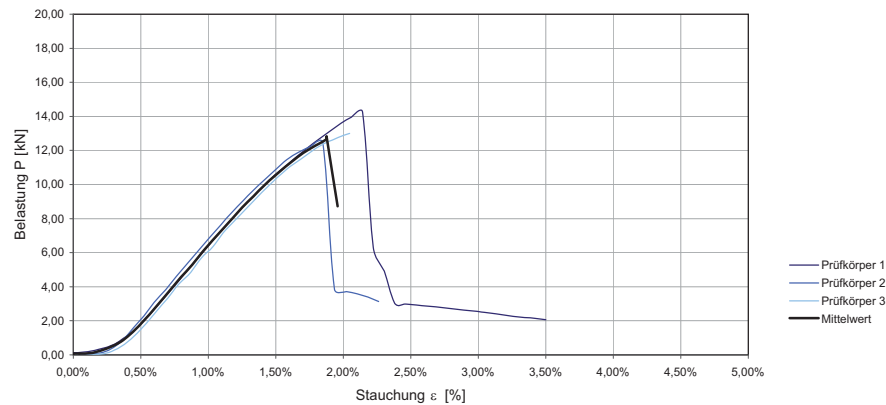
Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000%	0,000	0,000%	0,000	0,000%	0,000	0,000%	0,000
0,001%	0,020	0,069%	0,180	0,021%	0,010	0,030%	0,070
0,003%	0,050	0,145%	0,410	0,045%	0,020	0,064%	0,160
0,005%	0,100	0,227%	0,700	0,127%	0,030	0,119%	0,277
0,007%	0,160	0,304%	1,040	0,204%	0,040	0,171%	0,413
0,084%	0,170	0,383%	1,470	0,283%	0,470	0,250%	0,703
0,168%	0,190	0,469%	1,940	0,369%	0,940	0,335%	1,023
0,243%	0,360	0,552%	2,450	0,452%	1,450	0,415%	1,420
0,321%	0,460	0,632%	2,950	0,532%	1,950	0,495%	1,787
0,392%	0,690	0,719%	3,550	0,619%	2,550	0,576%	2,263
0,478%	1,150	0,806%	4,130	0,706%	3,130	0,663%	2,803
0,555%	1,670	0,896%	4,850	0,796%	3,850	0,749%	3,457
0,640%	2,270	0,986%	5,550	0,886%	4,550	0,837%	4,123
0,715%	2,670	1,067%	6,220	0,967%	5,220	0,916%	4,703
0,802%	3,310	1,153%	6,960	1,053%	5,960	1,002%	5,410
0,879%	3,850	1,236%	7,720	1,136%	6,720	1,084%	6,097
0,967%	4,770	1,314%	8,420	1,214%	7,420	1,165%	6,870
1,043%	5,590	1,396%	9,220	1,296%	8,220	1,245%	7,677
1,130%	6,490	1,477%	9,990	1,377%	8,990	1,328%	8,490
1,209%	7,370	1,556%	10,780	1,456%	9,780	1,407%	9,310
1,293%	8,290	1,636%	11,530	1,536%	10,530	1,488%	10,117
1,369%	9,140	1,716%	12,340	1,616%	11,340	1,567%	10,940
1,457%	10,110	1,797%	13,080	1,697%	12,080	1,650%	11,757
1,533%	10,960	1,876%	13,840	1,776%	12,840	1,728%	12,547
1,621%	11,930	1,952%	14,420	1,852%	13,420	1,808%	13,257
1,696%	12,750	2,035%	15,110	1,935%	14,110	1,888%	13,990
1,781%	13,640	2,111%	15,620	2,011%	14,620	1,968%	14,627
1,860%	14,490	2,191%	16,160	2,091%	15,160	2,047%	15,270
1,945%	15,270	2,264%	16,540	2,164%	15,540	2,124%	15,783
2,025%	15,960	2,345%	17,010	2,245%	16,010	2,205%	16,327
2,111%	16,460	2,414%	17,260	2,314%	16,260	2,280%	16,660
2,194%	16,920	2,496%	17,650	2,396%	16,650	2,362%	17,073
2,278%	17,310	2,569%	17,830	2,469%	16,830	2,438%	17,323
2,360%	17,680	2,649%	18,110	2,549%	17,110	2,519%	17,633
2,444%	18,030	2,721%	18,200	2,621%	17,200	2,595%	17,810
2,524%	18,280	2,802%	18,350	2,702%	17,350	2,676%	17,993
2,606%	18,490	2,875%	18,340	2,775%	17,340	2,752%	18,057
2,689%	18,690	2,953%	18,370	2,853%	17,370	2,832%	18,143
2,769%	18,730	3,022%	18,210	2,922%	17,210	2,904%	18,050
2,847%	18,810	3,102%	18,160	3,002%	17,160	2,983%	18,043
2,930%	18,830	3,172%	17,930	3,072%	16,930	3,058%	17,897
3,017%	18,900	3,256%	17,810	3,156%	16,810	3,143%	17,840
3,096%	18,770	3,327%	17,510	3,227%	16,510	3,216%	17,597
3,176%	18,650	3,408%	17,270	3,308%	16,270	3,297%	17,397
3,255%	18,410	3,483%	16,900	3,383%	15,900	3,374%	17,070
3,335%	18,150	3,566%	16,530	3,466%	15,530	3,456%	16,737
3,411%	17,680	3,647%	16,020	3,547%	15,020	3,535%	16,240
3,498%	16,950	3,735%	15,460	3,635%	14,460	3,623%	15,623
3,574%	16,190	3,816%	14,780	3,716%	13,780	3,702%	14,917
3,659%	15,650	3,908%	14,230	3,808%	13,230	3,791%	14,370
3,739%	15,170	3,991%	13,640	3,891%	12,640	3,874%	13,817
3,812%	14,700	4,080%	13,120	3,980%	12,120	3,957%	13,313
3,894%	14,230	4,157%	12,580	4,057%	11,580	4,036%	12,797
3,972%	13,780	4,247%	12,140	4,147%	11,140	4,122%	12,353
4,046%	13,260	4,332%	11,680	4,232%	10,680	4,203%	11,873
4,126%	12,790	4,421%	11,270	4,321%	10,270		
4,584%	4,180			4,576%	4,060		
4,661%	4,090			4,658%	4,030		
4,746%	4,020			4,740%	4,000		
4,788%	3,600			4,835%	3,640		

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht

D-04	Druckversuch			
Multistegplatte Makrolon 5X-32 PC	400x150x32	215 g	Polycarbonat	
Zentrischer Druckversuch	5 mm/min	Zeit-Wege-Messung		
21.10.2006	3 Prüfkörper	1 Aufnehmer seitlich		

Lastverformungsdiagramm D-04 / Multistegplatte 5X-32



D-04

Ermittlung der Drucksteifigkeit

1	Drucksteifigkeit D	$D = dP/d\varepsilon$	892,874 kN
2	Querschnitt volle Fläche	A	48 cm ²
3	Äquivalenter Druckmodul	$E_{eq} = D / A$	18,602 kN/cm ²
4	Vergleich: Vollplatte PC		230
5	Maximallast	P_{max}	12,8 kN
6	Breitennormierte Drucksteifigkeit	D_b	5952 kN/m
7	Drucksteifigkeit nach Sandwichtheorie	$D = 2 E_s t_s b$	4600 kN/m

Referenz Vollplatte

Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
 Querkontraktion bleibt unberücksichtigt
 Außenabmessungen Querschnitt

Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse
 Tatsächlicher E-Modul des Materials

Maximale Last vor dem Ausknicken / Versagen

Wert aus 1 auf Referenzbreite von 1 Meter bezogen
 Nur die Deckschichten werden für den Lastabtrag angesetzt [kle05]


Leichtbaukennzahlen

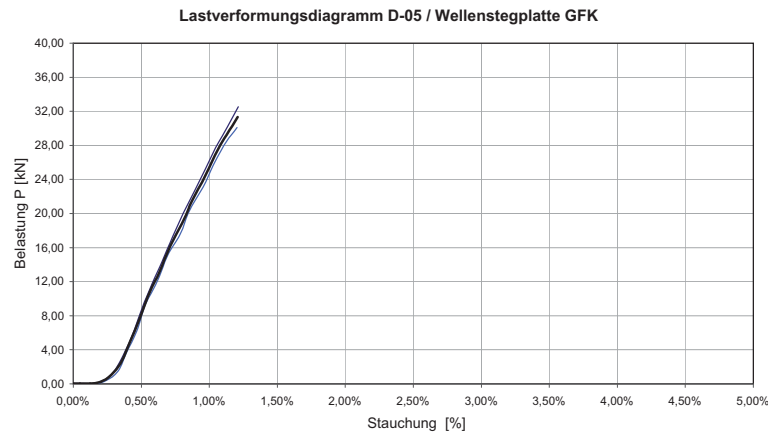
8	Gewicht Prüfkörper	absolut	215 g	9%	Durchschnittsgewicht Prüfkörper
9	Vergleich: Vollplatte	1,2 g/cm ³	2304 g		Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts
10	Verhältnis Drucksteifigkeit zu Gewicht	$\delta = D / G$	4,15 kN/g	87%	Drucksteifigkeit pro Gewicht
11	Vergleich: Vollplatte PC	—	4,79		Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

D-04**Messdaten**

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000%	0,100	0,000%	0,000	0,000%	0,010	0,000%	0,037
0,000%	0,140	0,010%	0,030	0,000%	0,030	0,003%	0,067
0,034%	0,130	0,025%	0,040	0,074%	0,030	0,044%	0,067
0,082%	0,170	0,035%	0,040	0,146%	0,030	0,088%	0,080
0,132%	0,230	0,050%	0,040	0,229%	0,070	0,137%	0,113
0,184%	0,320	0,059%	0,040	0,303%	0,280	0,182%	0,213
0,241%	0,440	0,137%	0,060	0,389%	0,670	0,256%	0,390
0,309%	0,640	0,219%	0,150	0,466%	1,220	0,331%	0,670
0,373%	0,970	0,298%	0,440	0,545%	1,870	0,405%	1,093
0,448%	1,430	0,370%	0,900	0,620%	2,590	0,479%	1,640
0,524%	2,020	0,443%	1,580	0,701%	3,340	0,556%	2,313
0,602%	2,680	0,524%	2,280	0,782%	4,150	0,636%	3,037
0,680%	3,410	0,599%	3,080	0,871%	4,860	0,716%	3,783
0,762%	4,170	0,685%	3,830	0,947%	5,660	0,798%	4,553
0,841%	4,930	0,764%	4,610	1,036%	6,360	0,880%	5,300
0,925%	5,700	0,847%	5,370	1,111%	7,170	0,961%	6,080
1,009%	6,470	0,928%	6,140	1,202%	7,910	1,046%	6,840
1,090%	7,240	1,012%	6,900	1,283%	8,620	1,128%	7,587
1,173%	7,960	1,094%	7,640	1,367%	9,280	1,211%	8,293
1,252%	8,640	1,176%	8,360	1,447%	9,940	1,292%	8,980
1,333%	9,330	1,258%	9,040	1,531%	10,530	1,374%	9,633
1,413%	9,940	1,339%	9,700	1,608%	11,070	1,453%	10,237
1,494%	10,560	1,420%	10,320	1,700%	11,580	1,538%	10,820
1,578%	11,110	1,501%	10,890	1,783%	12,070	1,621%	11,357
1,657%	11,650	1,582%	11,470	1,873%	12,450	1,704%	11,857
1,739%	12,170	1,674%	11,910	1,960%	12,750	1,791%	12,277
1,822%	12,680	1,756%	12,240	2,047%	13,000	1,875%	12,640
1,903%	13,150	1,849%	12,480			1,876%	12,815
1,983%	13,600	1,934%	3,840			1,959%	8,720
2,061%	13,960	2,023%	3,710				
2,142%	14,260	2,103%	3,590				
2,221%	6,300	2,183%	3,400				
2,303%	4,920	2,262%	3,130				
2,382%	3,030						
2,462%	2,980						
2,542%	2,920						
2,623%	2,860						
2,703%	2,790						
2,784%	2,730						
2,858%	2,650						
2,944%	2,580						
3,046%	2,500						
3,118%	2,420						
3,185%	2,350						
3,269%	2,260						
3,345%	2,190						
3,425%	2,130						
3,501%	2,070						

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmäßig beansprucht.

D-05	Druckversuch			
Wellenstegplatte GFK "Scobalit ILE 30"	400x210x30	460 g	GFK 30%	
Zentrischer Druckversuch	5 mm/min	Zeit-Wege-Messung		
21.10.2006	2 Prüfkörper	1 Aufnehmer seitlich		



D-05

Ermittlung der Drucksteifigkeit

1	Drucksteifigkeit D	$D = dP/d\varepsilon$	3484,893 kN
2	Querschnitt volle Fläche	A	63 cm ²
3	Äquivalenter Druckmodul	$E_{eq} = D / A$	55,316 kN/cm²
4	Vergleich: Vollplatte GFK		800
5	Maximallast	P_{max}	31,3 kN
6	Breitennormierte Drucksteifigkeit	D_b	16595 kN/m
7	Drucksteifigkeit nach Sandwichtheorie	$D = 2 E_c t_c b$	24000 kN/m

Referenz Vollplatte

Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
 Querkontraktion bleibt unberücksichtigt
 Außenabmessungen Querschnitt

Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse
 Tatsächlicher E-Modul des Materials

Maximale Last vor dem Ausknicken / Versagen

Wert aus 1 auf Referenzbreite von 1 Meter bezogen
 Nur die Deckschichten werden für den Lastabtrag angesetzt [kle05]

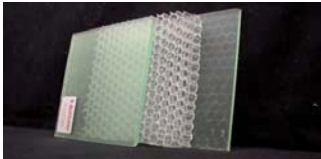
Leichtbaukennzahlen

8	Gewicht Prüfkörper	absolut	460 g	8%	Durchschnittsgewicht Prüfkörper
9	Vergleich: Vollplatte	1,2 g/cm ³	5544 g		Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts
10	Verhältnis Drucksteifigkeit zu Gewicht	$\delta = D / G$	7,58 kN/g	83%	Drucksteifigkeit pro Gewicht
11	Vergleich: Vollplatte GFK	—	9,09		Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

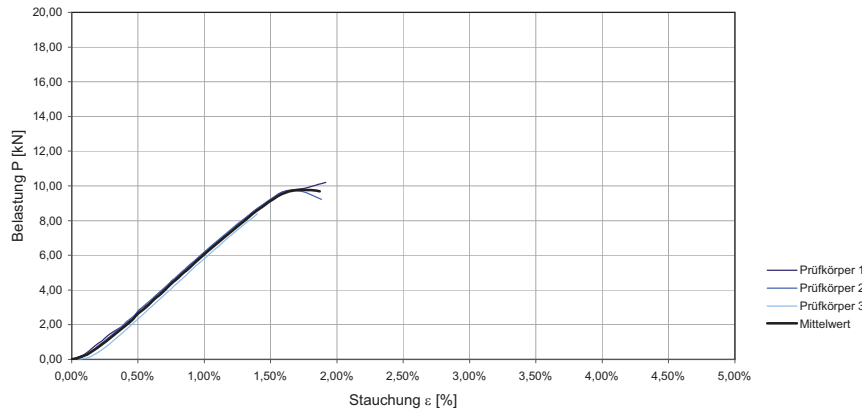
D-05**Messdaten**

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000%	0,000	0,000%	0,000	0,000%	0,000
0,000%	0,030	0,000%	0,030	0,000%	0,030
0,077%	0,040	0,020%	0,030	0,048%	0,035
0,156%	0,040	0,089%	0,030	0,123%	0,035
0,230%	0,440	0,171%	0,040	0,201%	0,240
0,307%	1,600	0,244%	0,420	0,275%	1,010
0,372%	3,490	0,328%	1,500	0,350%	2,495
0,440%	6,010	0,393%	3,710	0,416%	4,860
0,506%	8,900	0,465%	6,200	0,486%	7,550
0,580%	11,770	0,532%	9,370	0,556%	10,570
0,655%	14,400	0,617%	12,000	0,636%	13,200
0,731%	17,280	0,693%	15,070	0,712%	16,175
0,810%	20,090	0,785%	17,530	0,797%	18,810
0,893%	22,700	0,859%	20,550	0,876%	21,625
0,971%	25,260	0,953%	23,070	0,962%	24,165
1,052%	27,930	1,030%	25,700	1,041%	26,815
1,135%	30,190	1,118%	28,240	1,126%	29,215
1,214%	32,520	1,203%	30,110	1,208%	31,315

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht.

D-06		Druckversuch		
Tubuswabenplatte "Airboard"		400x150x20	225 g Polycarbonat	
Zentrischer Druckversuch		5 mm/min	Zeit-Wege-Messung	
23.04.2007		3 Prüfkörper	1 Aufnehmer seitlich	

Lastverformungsdiagramm D-06 / Tubuswabenplatte



Belastung P [kN]

Stauchung ε [%]

— Prüfkörper 1

— Prüfkörper 2

— Prüfkörper 3

— Mittelwert

D-06				
<u>Ermittlung der Drucksteifigkeit</u>			Referenz Vollplatte	
1	Drucksteifigkeit D	$D = dP/dε$	691,101 kN	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Querschnitt volle Fläche	A	30 cm²	Querkontraktion bleibt unberücksichtigt
3	Äquivalenter Druckmodul	$E_{eq} = D / A$	23,037 kN/cm²	Außenabmessungen Querschnitt
4	Vergleich: Vollplatte PC		230	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse
5	Maximallast	P_{max}	12,8 kN	Tatsächlicher E-Modul des Materials
6	Breitennormierte Drucksteifigkeit	D_b	4607 kN/m	Maximale Last vor dem Ausknicken / Versagen
7	Drucksteifigkeit nach Sandwichtheorie	$D = 2 E_{fo} t_o b$	4600 kN/m	Wert aus 1 auf Referenzbreite von 1 Meter bezogen
Nur die Deckschichten werden für den Lastabtrag angesetzt [kle05]				
<u>Leichtbaukennzahlen</u>				
8	Gewicht Prüfkörper	absolut	225 g	16%
9	Vergleich: Vollplatte	1,2 g/cm³	1440 g	Durchschnittsgewicht Prüfkörper
10	Verhältnis Drucksteifigkeit zu Gewicht	$δ = D / G$	3,07 kN/g	Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts
11	Vergleich: Vollplatte PC		4,79	Drucksteifigkeit pro Gewicht
				Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

D-06

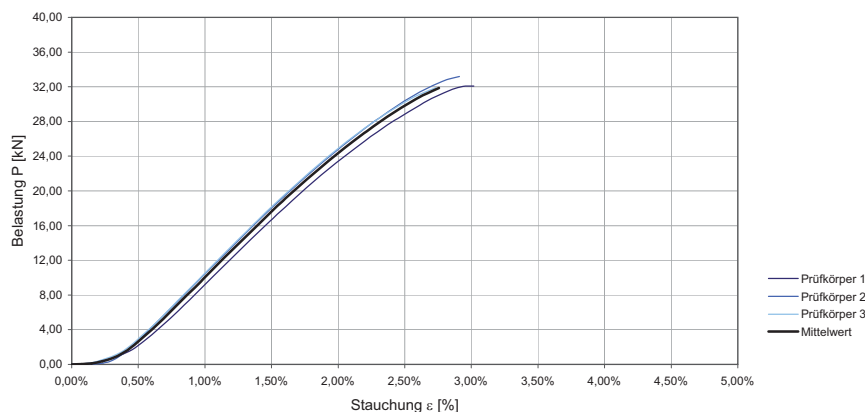
Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000%	0,000	0,000%	0,000	0,001%	0,030	0,000%	0,010
0,010%	0,030	0,010%	0,030	0,000%	0,020	0,007%	0,027
0,028%	0,080	0,053%	0,080	0,027%	0,030	0,036%	0,063
0,077%	0,230	0,087%	0,210	0,072%	0,030	0,078%	0,157
0,115%	0,380	0,125%	0,360	0,111%	0,070	0,117%	0,270
0,150%	0,620	0,170%	0,600	0,148%	0,190	0,156%	0,470
0,191%	0,860	0,211%	0,840	0,190%	0,360	0,197%	0,687
0,226%	1,050	0,243%	1,030	0,229%	0,560	0,233%	0,880
0,269%	1,350	0,289%	1,320	0,271%	0,810	0,276%	1,160
0,317%	1,620	0,330%	1,590	0,311%	1,060	0,319%	1,423
0,388%	1,930	0,375%	1,900	0,348%	1,300	0,370%	1,710
0,426%	2,200	0,413%	2,170	0,394%	1,610	0,411%	1,993
0,472%	2,450	0,452%	2,420	0,433%	1,870	0,453%	2,247
0,500%	2,780	0,499%	2,750	0,477%	2,180	0,492%	2,570
0,546%	3,050	0,539%	3,030	0,516%	2,440	0,534%	2,840
0,597%	3,340	0,579%	3,310	0,557%	2,730	0,577%	3,127
0,626%	3,620	0,621%	3,590	0,603%	3,060	0,617%	3,423
0,681%	3,940	0,666%	3,910	0,641%	3,320	0,663%	3,723
0,723%	4,210	0,705%	4,180	0,684%	3,620	0,704%	4,003
0,749%	4,490	0,744%	4,460	0,727%	3,920	0,740%	4,290
0,799%	4,770	0,786%	4,740	0,769%	4,220	0,784%	4,577
0,840%	5,090	0,833%	5,060	0,806%	4,480	0,826%	4,877
0,883%	5,360	0,871%	5,320	0,848%	4,760	0,867%	5,147
0,925%	5,650	0,915%	5,620	0,891%	5,060	0,910%	5,443
0,967%	5,940	0,957%	5,900	0,935%	5,370	0,953%	5,737
1,011%	6,200	0,998%	6,170	0,971%	5,620	0,993%	5,997
1,052%	6,510	1,043%	6,480	1,017%	5,920	1,037%	6,303
1,099%	6,780	1,084%	6,750	1,059%	6,210	1,081%	6,580
1,132%	7,010	1,122%	6,980	1,101%	6,490	1,118%	6,827
1,185%	7,290	1,167%	7,270	1,141%	6,760	1,164%	7,107
1,224%	7,590	1,214%	7,570	1,186%	7,050	1,208%	7,403
1,264%	7,830	1,249%	7,800	1,227%	7,310	1,247%	7,647
1,307%	8,100	1,297%	8,080	1,272%	7,600	1,292%	7,927
1,347%	8,360	1,340%	8,340	1,314%	7,870	1,334%	8,190
1,399%	8,670	1,387%	8,630	1,351%	8,090	1,379%	8,463
1,438%	8,900	1,428%	8,860	1,401%	8,400	1,423%	8,720
1,481%	9,110	1,471%	9,080	1,442%	8,640	1,465%	8,943
1,525%	9,360	1,520%	9,330	1,487%	8,900	1,510%	9,197
1,567%	9,570	1,567%	9,540	1,530%	9,120	1,555%	9,410
1,610%	9,700	1,608%	9,670	1,573%	9,340	1,597%	9,570
1,659%	9,760	1,654%	9,730	1,621%	9,570	1,645%	9,687
1,704%	9,810	1,704%	9,730	1,667%	9,730	1,692%	9,757
1,751%	9,860	1,751%	9,650	1,706%	9,780	1,736%	9,763
1,796%	9,940	1,796%	9,530	1,757%	9,820	1,783%	9,763
1,838%	10,030	1,838%	9,370	1,806%	9,800	1,827%	9,733
1,881%	10,130	1,881%	9,230	1,850%	9,720	1,871%	9,693
1,915%	10,210			1,894%	9,630		
				1,941%	9,540		
				1,984%	9,440		
				2,027%	9,360		
				2,066%	9,240		

D-07	Druckversuch		
3D-Wabenplatte "clear pep"	400x150x40	450 g	Polycarbonat
Zentrischer Druckversuch	5 mm/min	Zeit-Wege-Messung	
21.10.2006	3 Prüfkörper	1 Aufnehmer seitlich	



Lastverformungsdiagramm D-06 / 3D Wabenplatte



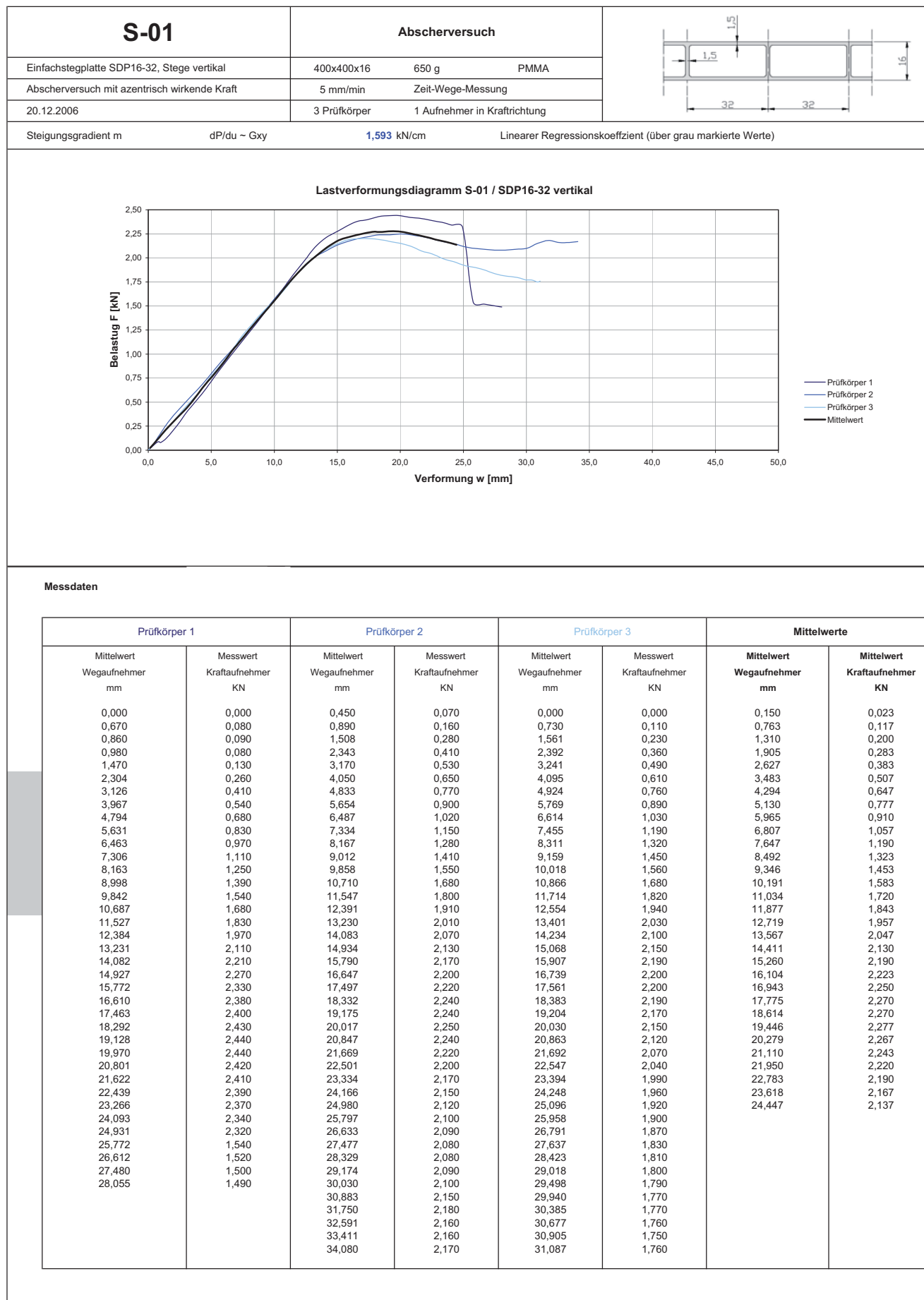
D-07

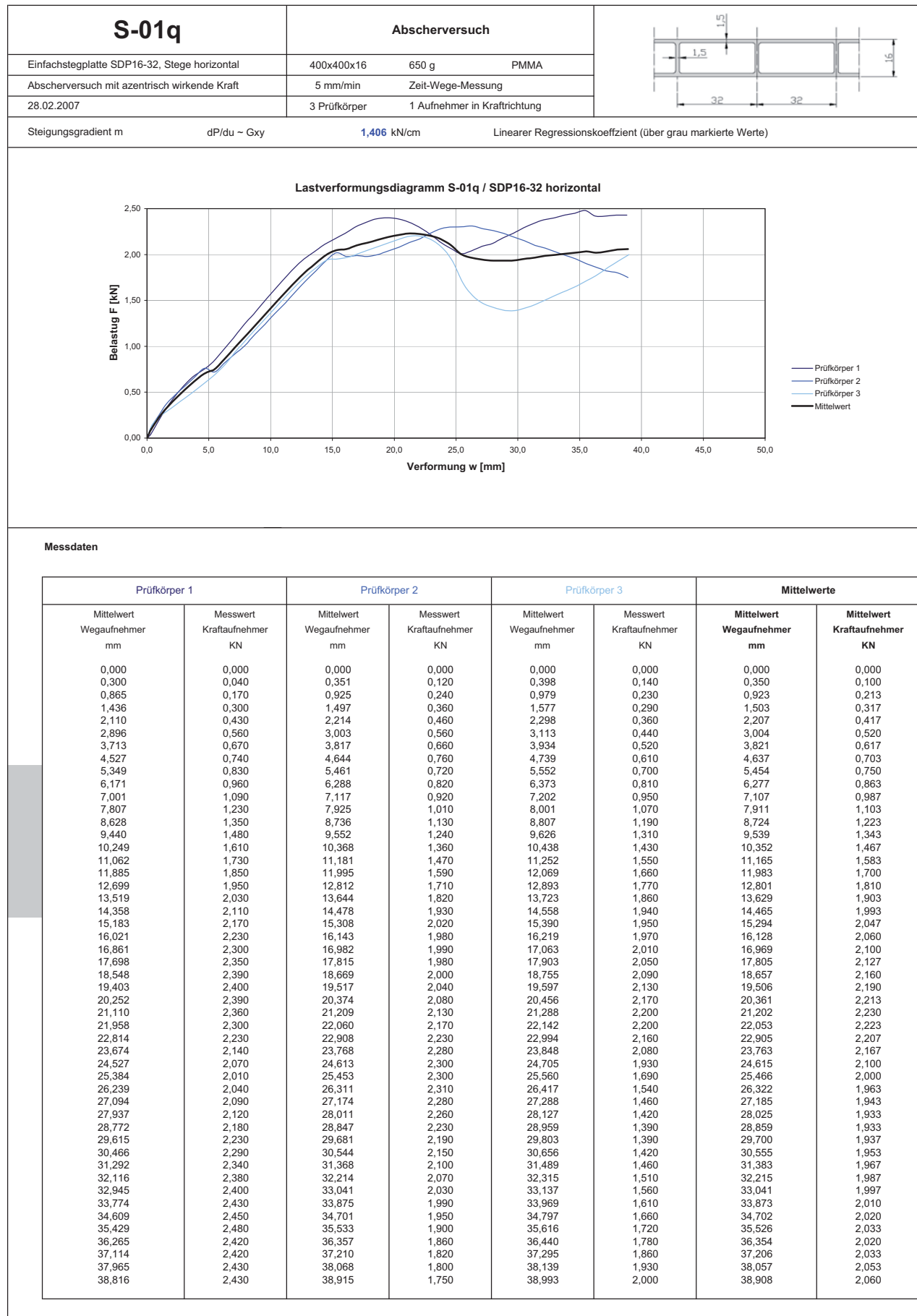
Ermittlung der Drucksteifigkeit			Referenz Vollplatte	
1	Drucksteifigkeit D	$D = dP/dc$	1507,128 kN	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Querschnitt volle Fläche	A	60 cm ²	Querkontraktion bleibt unberücksichtigt
3	Äquivalenter Druckmodul	$E_{eq} = D / A$	25,119 kN/cm ²	Außenabmessungen Querschnitt
4	Vergleich: Vollplatte PC		230	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse
5	Maximallast	P_{max}	31,9 kN	Tatsächlicher E-Modul des Materials
6	Breitennormierte Drucksteifigkeit	D_b	10048 kN/m	Maximale Last vor dem Ausknicken / Versagen
7	Drucksteifigkeit nach Sandwichtheorie	$D = 2 E_o t_o b$	9200 kN/m	Wert aus 1 auf Referenzbreite von 1 Meter bezogen
Nur die Deckschichten werden für den Lastabtrag angesetzt [kle05]				
Leichtbaukennzahlen				
8	Gewicht Prüfkörper	absolut	450 g	16%
9	Vergleich: Vollplatte	1,2 g/cm ³	2880 g	Durchschnittsgewicht Prüfkörper
10	Verhältnis Drucksteifigkeit zu Gewicht	$\delta = D / G$	3,35 kN/g	70%
11	Vergleich: Vollplatte PC		4,79	Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts
				Drucksteifigkeit pro Gewicht
				Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

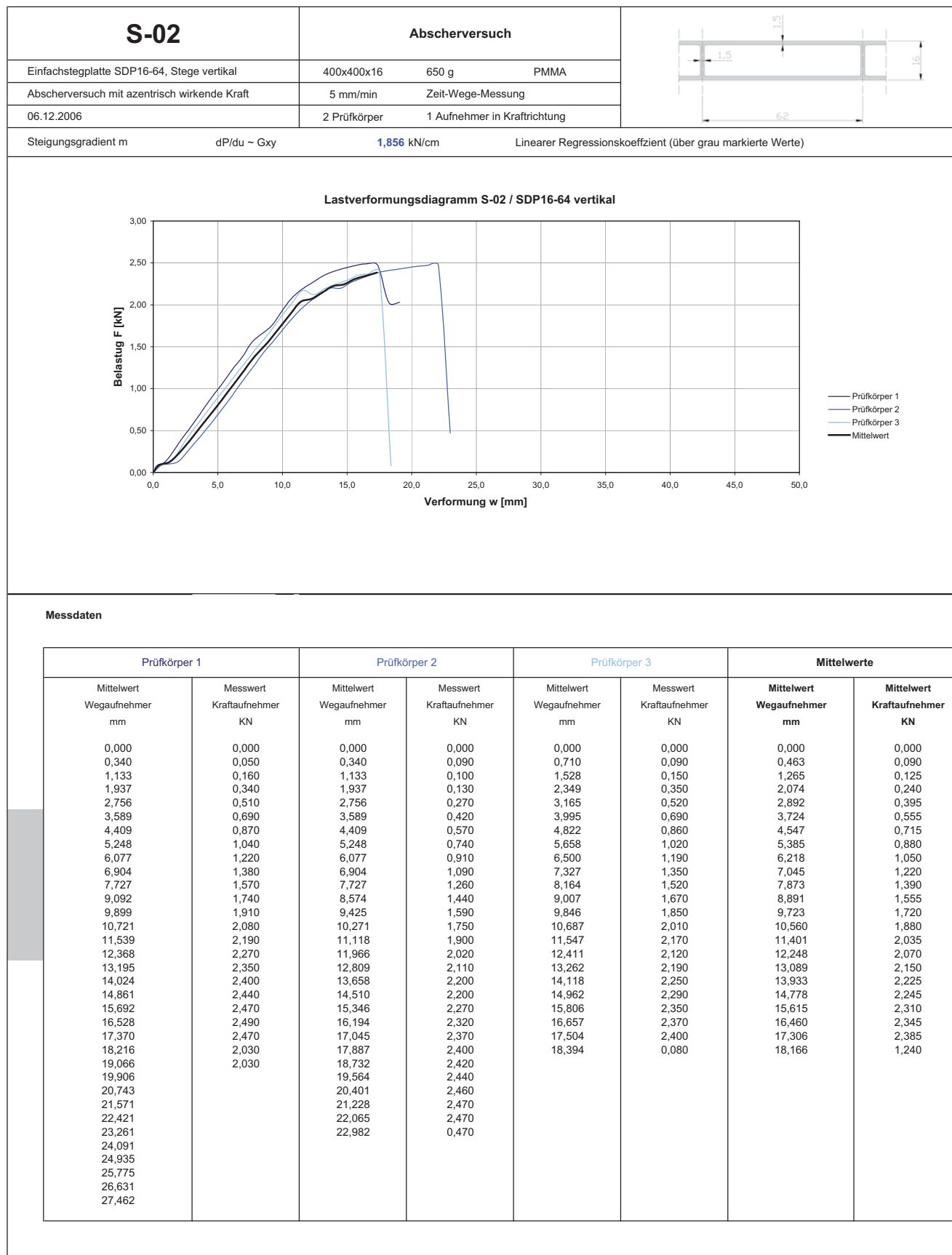
D-07**Messdaten**

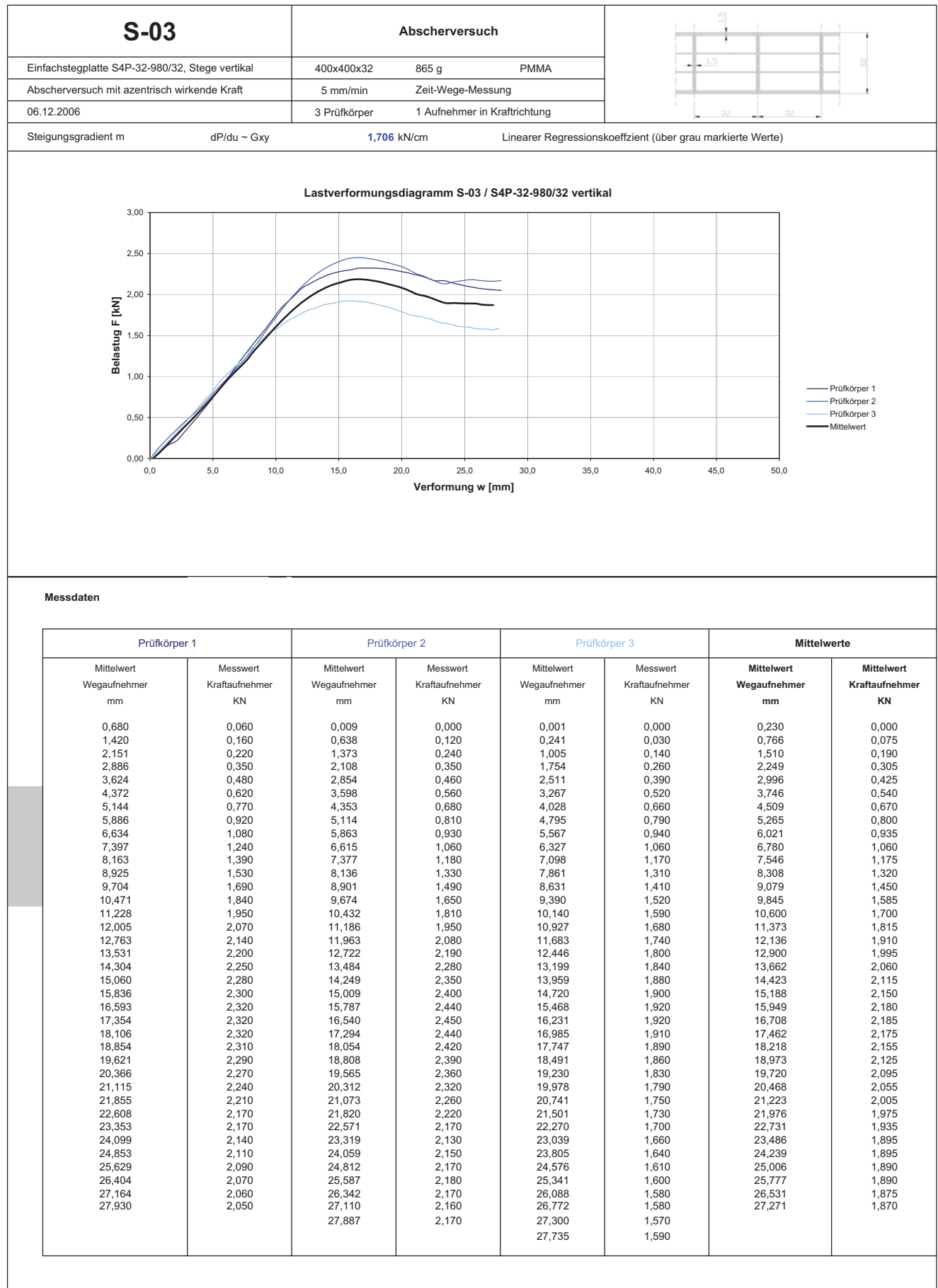
Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000%	0,000	0,000%	0,000	0,000%	0,000	0,000%	0,000
0,076%	0,060	0,076%	0,030	0,073%	0,050	0,075%	0,047
0,149%	0,140	0,149%	0,050	0,147%	0,180	0,148%	0,123
0,232%	0,410	0,236%	0,150	0,225%	0,500	0,231%	0,353
0,304%	0,730	0,308%	0,470	0,297%	0,890	0,303%	0,697
0,382%	1,190	0,385%	1,200	0,375%	1,440	0,381%	1,277
0,453%	1,680	0,451%	2,060	0,451%	2,290	0,452%	2,010
0,530%	2,530	0,533%	3,250	0,523%	3,270	0,529%	3,017
0,605%	3,460	0,608%	4,370	0,601%	4,340	0,605%	4,057
0,686%	4,560	0,691%	5,660	0,678%	5,490	0,685%	5,237
0,762%	5,630	0,769%	6,840	0,759%	6,730	0,763%	6,400
0,845%	6,860	0,857%	8,220	0,842%	8,030	0,848%	7,703
0,921%	7,980	0,933%	9,400	0,921%	9,240	0,925%	8,873
1,007%	9,310	1,020%	10,740	1,002%	10,520	1,009%	10,190
1,083%	10,460	1,095%	11,920	1,080%	11,740	1,086%	11,373
1,171%	11,780	1,183%	13,260	1,160%	13,000	1,171%	12,680
1,244%	12,890	1,257%	14,380	1,238%	14,180	1,246%	13,817
1,330%	14,170	1,343%	15,720	1,319%	15,420	1,331%	15,103
1,406%	15,320	1,414%	16,750	1,395%	16,560	1,405%	16,210
1,490%	16,530	1,502%	18,060	1,478%	17,820	1,490%	17,470
1,562%	17,580	1,575%	19,090	1,552%	18,880	1,563%	18,517
1,647%	18,770	1,662%	20,340	1,636%	20,090	1,648%	19,733
1,725%	19,840	1,734%	21,290	1,710%	21,110	1,723%	20,747
1,802%	20,870	1,819%	22,470	1,792%	22,240	1,804%	21,860
1,882%	21,930	1,895%	23,460	1,870%	23,260	1,882%	22,883
1,971%	23,040	1,975%	24,490	1,948%	24,270	1,964%	23,933
2,042%	23,920	2,048%	25,370	2,021%	25,120	2,037%	24,803
2,123%	24,860	2,133%	26,420	2,101%	26,110	2,119%	25,797
2,200%	25,760	2,207%	27,280	2,180%	27,000	2,196%	26,680
2,290%	26,750	2,294%	28,260	2,260%	27,900	2,281%	27,637
2,367%	27,570	2,365%	28,980	2,336%	28,650	2,356%	28,400
2,450%	28,370	2,448%	29,870	2,420%	29,510	2,439%	29,250
2,530%	29,140	2,520%	30,560	2,494%	30,170	2,515%	29,957
2,614%	29,880	2,605%	31,350	2,575%	30,870	2,598%	30,700
2,693%	30,560	2,677%	31,900	2,651%	31,390	2,674%	31,283
2,779%	31,210	2,761%	32,500	2,732%	31,880	2,757%	31,863
2,857%	31,720	2,832%	32,890				
2,936%	32,040	2,911%	33,180				
3,019%	32,070						

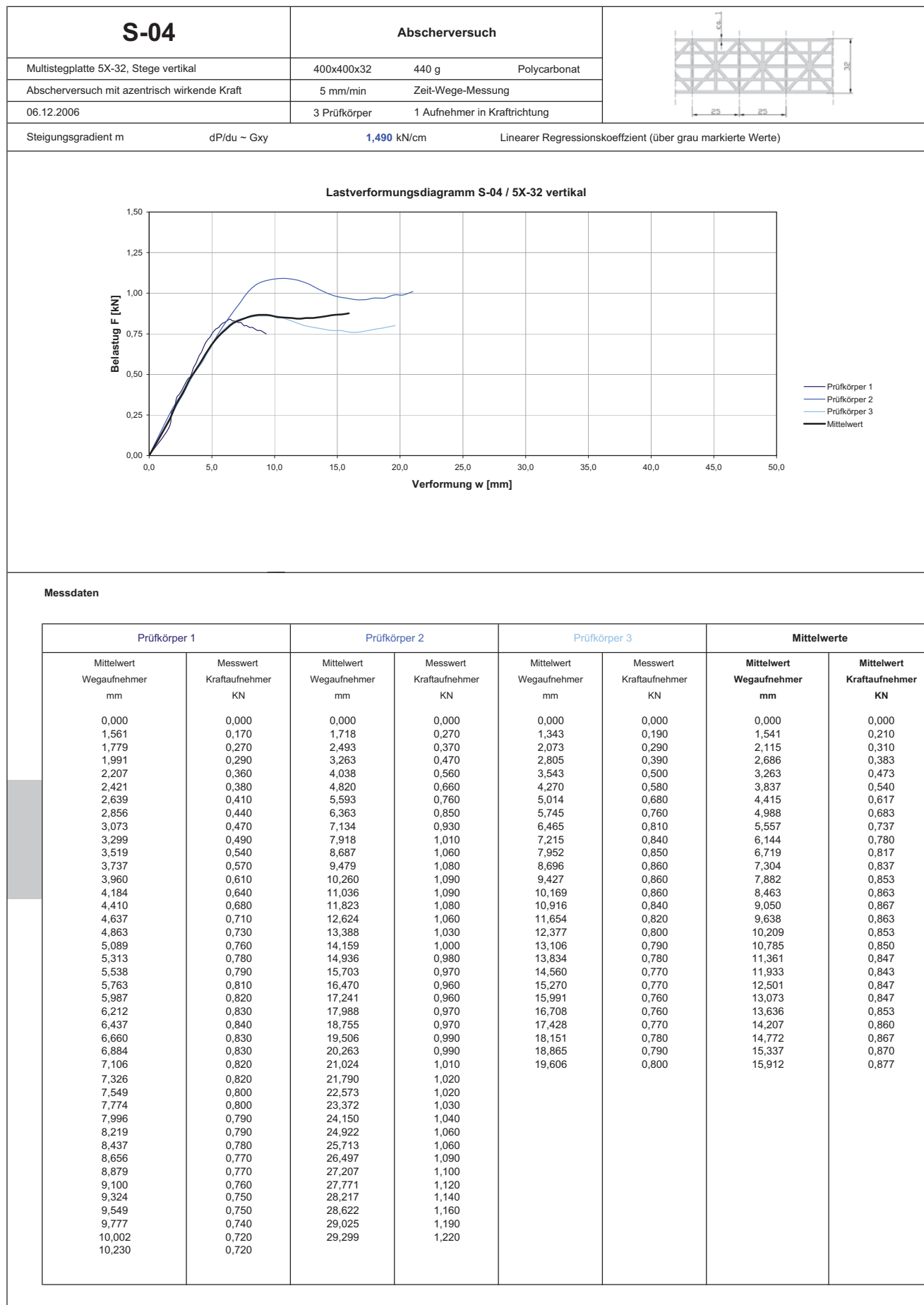
Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht

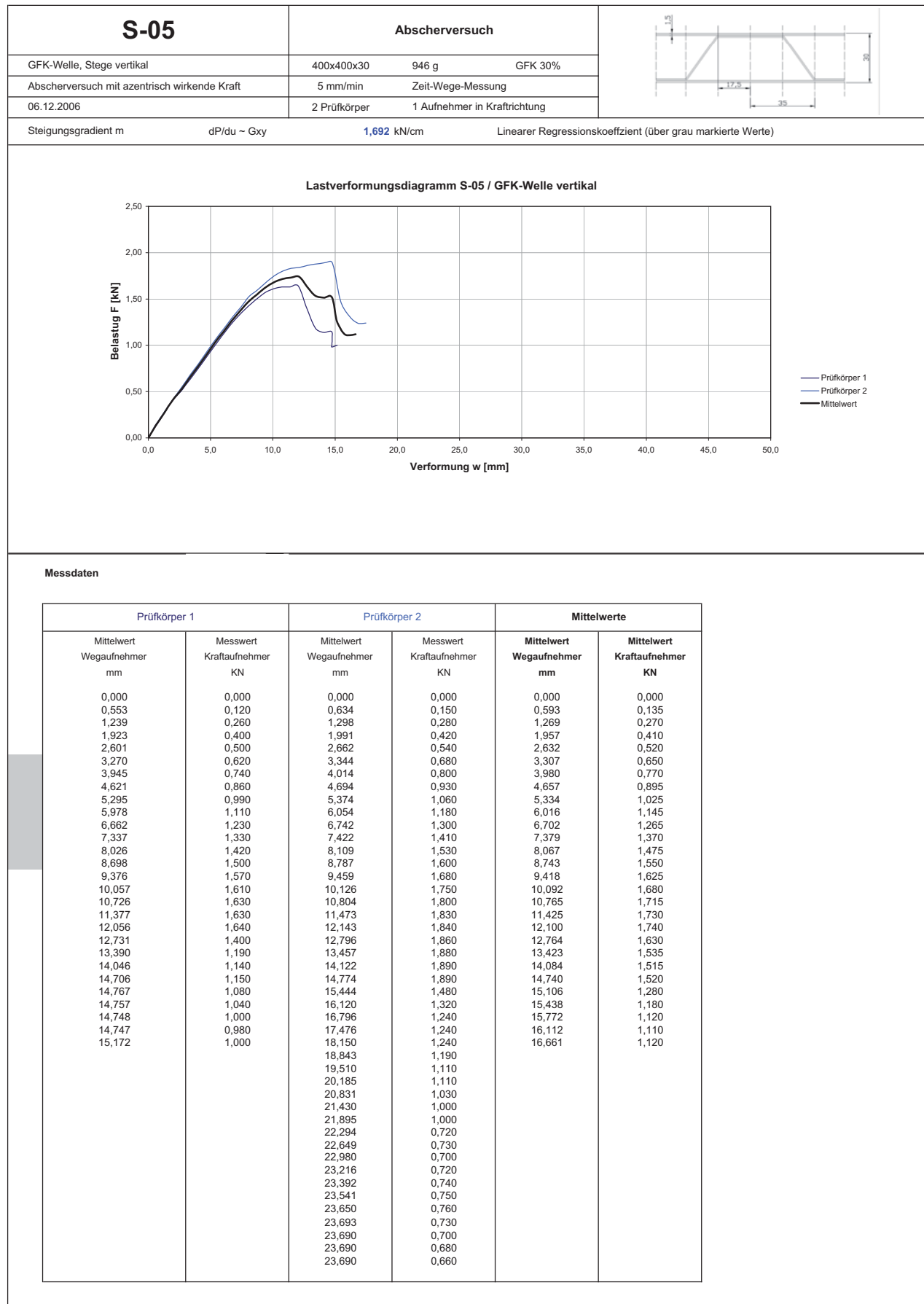


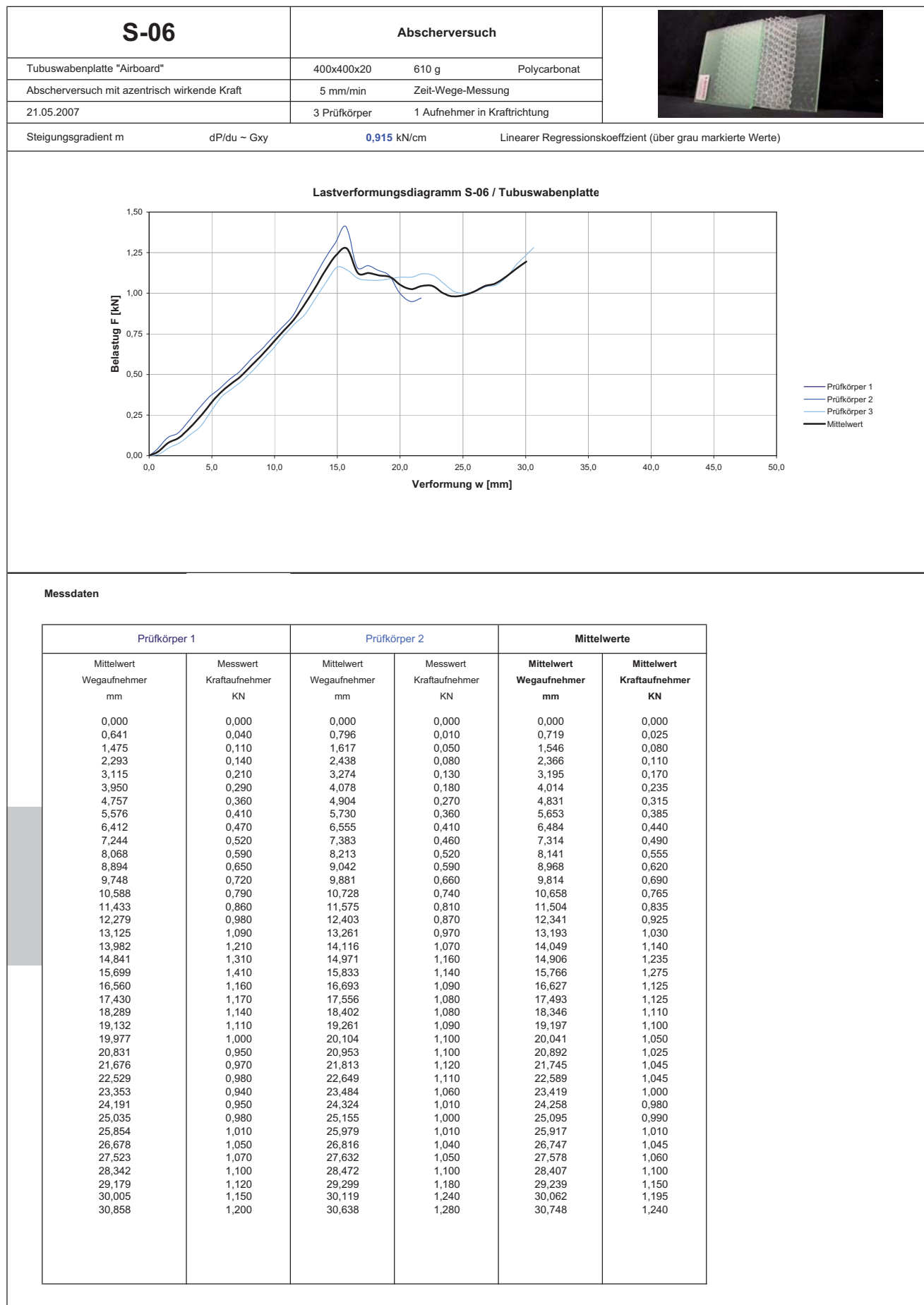


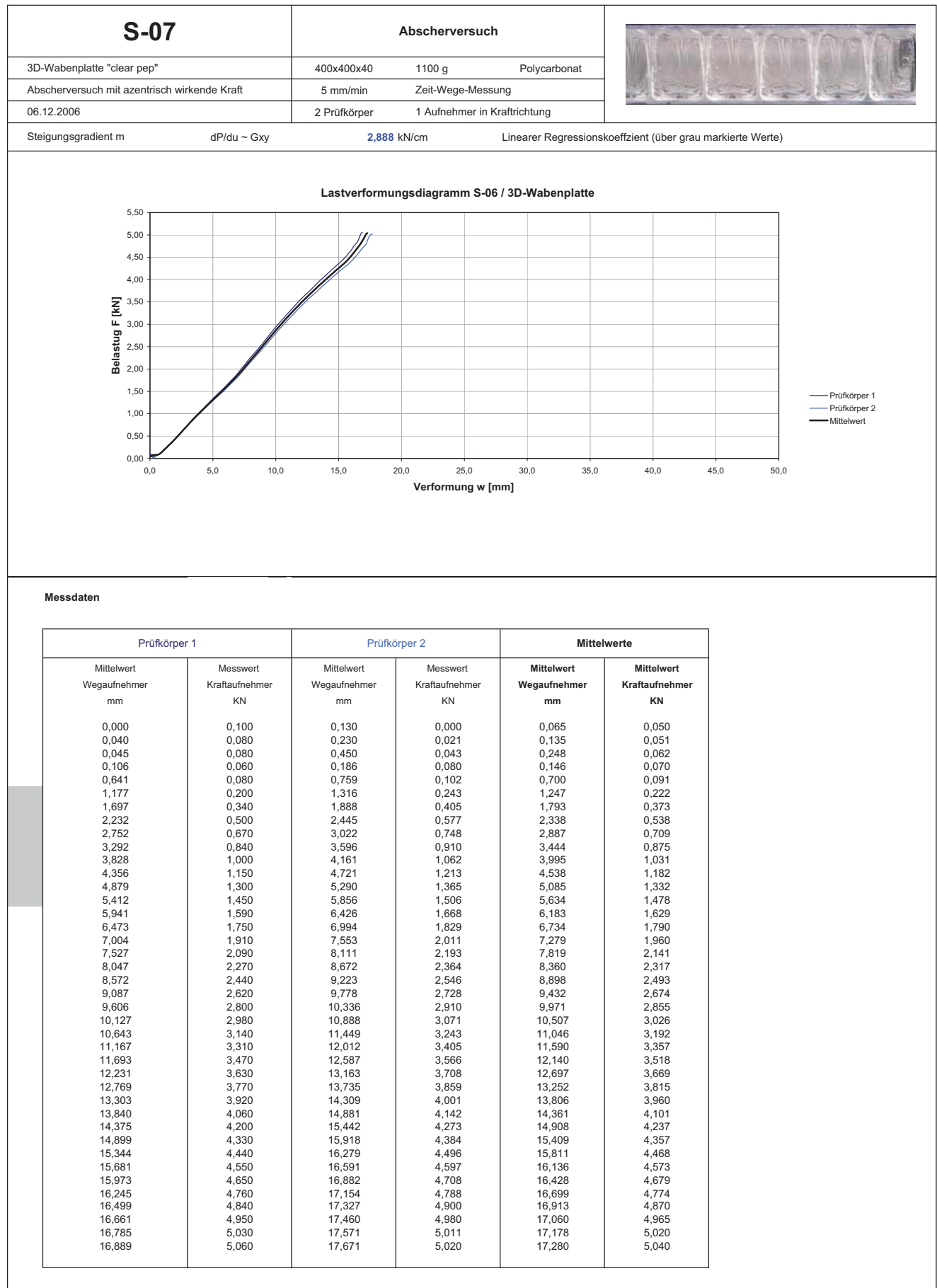







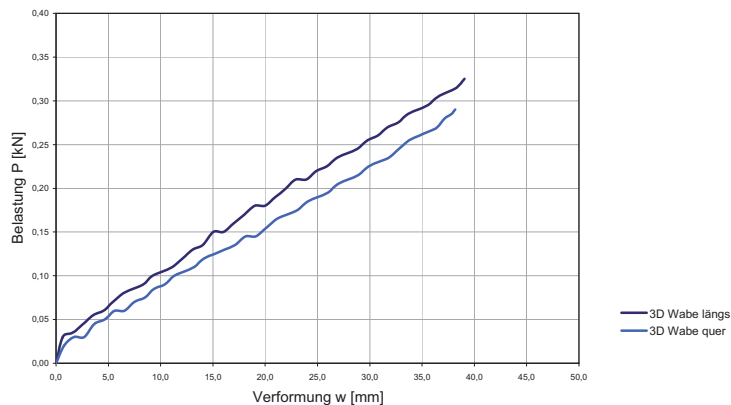






Biegung Kern	Biegeversuch			
3D-Wabenkern 36mm längs / quer	800x150x36	530 g	Polycarbonat	
4-Punkt-Biegeversuch über 75 mm	5 mm/min	Zeit-Wege-Messung		
15.11.2006	je 2 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte		

Lastverformungsdiagramm / 3D-Wabenkern 36mm



Biegung Kern


Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse		"Starke Achse" Längs	"Schwache Achse" Quer	(blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)
1	Steigungsgradient m dP/dw	0,079 kN/cm	0,072 kN/cm	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Durchbiegungsfaktor k $= 23/1296$			Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]
3	Gesamtsteifigkeit B $= m \cdot k \cdot l^3$	590,173 kNcm ²	542,465 kNcm ²	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse, Schubverformung eingeschlossen
Vergleichskennwerte Steifigkeit				
4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite $B_s = B / b$	393 Nm ² /m	362 Nm ² /m	breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=15 cm
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite $= E \cdot I_y$	399 Nm ² /m	399 Nm ² /m	I aus Querschnitt und E des Werkstoffs
5a	Anteil Schubverformung $\gamma = 1 - B_s / E \cdot I_y$	1%	9%	Schubverformung des Kerns
5b	Schubmodul G $= m \cdot l / \gamma \cdot 6db$	1,394 kN/cm ²	0,181 kN/cm ²	Berechnung nach [kle05]
6	Sandwich-Biegesteifigkeit $B_s = E_o \cdot t_o \cdot d^2 / 2$	493 Nm ² /m	469 Nm ² /m	Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]
7	Äquivalentes E-Modul $E_{\text{äq}}$ $E_{\text{äq}} = B / I_y$	10 kN/cm ²	9 kN/cm ²	Äquivalenter E-Modul eines Vollquerschnitts
7a	Vergleich: Vollplatte PMMA E	230 kN/cm ²	230 kN/cm ²	Tatsächlicher E-Modul des Werkstoffs
8	Trägheitsmoment absolut, geschätzt I_y	2,600 cm ⁴	2,600 cm ⁴	Trägheitsmoment I y tatsächlicher Querschnitt
8a	Vergleich: Vollplatte $I_y = h^3 b / 12$	58,320 cm ⁴	58,320 cm ⁴	Trägheitsmoment I y Referenz-Vollquerschnitt
Leichtbaukennzahlen				
9	Gewicht Platte absolut	530 g	530 g	Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
9a	Vergleich: Vollplatte PC	5184 g	5184 g	Rohdichte: 1,2 g/cm ³
10	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht $b = B / G$	1,11	1,02	Biegesteifigkeit pro Gewicht
10a	Vergleich: Vollplatte PC	2,59	2,59	Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

Biegung Kern

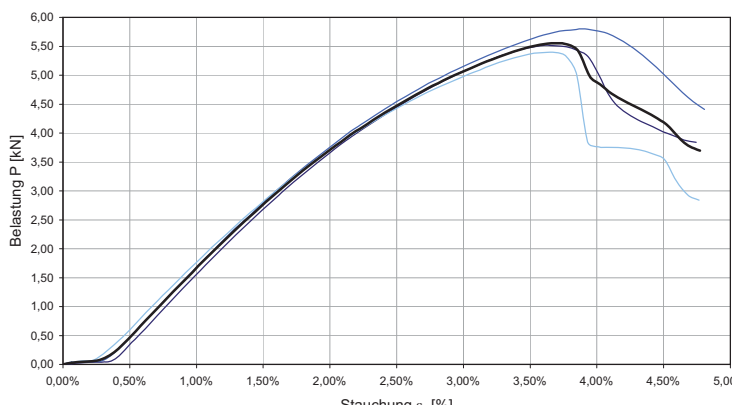
Messdaten: Mittelwerte aus je 3 Prüfkörpern

Prüfkörper 1 - Starke Achse		Prüfkörper 2 - Schwache Achse	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,008	0,000	0,000	0,000
0,635	0,030	0,777	0,020
1,629	0,035	1,726	0,030
2,593	0,045	2,699	0,030
3,568	0,055	3,669	0,045
4,538	0,060	4,640	0,050
5,454	0,070	5,597	0,060
6,410	0,080	6,521	0,060
7,352	0,085	7,497	0,070
8,317	0,090	8,454	0,075
9,232	0,100	9,393	0,085
10,167	0,105	10,366	0,090
11,125	0,110	11,296	0,100
12,094	0,120	12,262	0,105
13,072	0,130	13,197	0,110
14,040	0,135	14,161	0,120
15,024	0,150	15,146	0,125
16,008	0,150	16,149	0,130
16,998	0,160	17,129	0,135
18,008	0,170	18,137	0,145
18,997	0,180	19,117	0,145
19,983	0,180	20,117	0,155
20,971	0,190	21,116	0,165
21,966	0,200	22,078	0,170
22,936	0,210	23,069	0,175
23,934	0,210	24,056	0,185
24,904	0,220	25,023	0,190
25,898	0,225	25,997	0,195
26,879	0,235	26,971	0,205
27,849	0,240	27,928	0,210
28,823	0,245	28,912	0,215
29,794	0,255	29,882	0,225
30,761	0,260	30,845	0,230
31,725	0,270	31,830	0,235
32,695	0,275	32,808	0,245
33,662	0,285	33,771	0,255
34,627	0,290	34,716	0,260
35,589	0,295	35,635	0,265
36,558	0,305	36,465	0,270
37,459	0,310	37,206	0,280
38,286	0,315	37,792	0,285
39,049	0,325	38,159	0,290

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht.

Druck Kern		Druckversuch		
3D Wabenkern 36mm längs		400x150x36	264 g Polycarbonat	
Zentrischer Druckversuch		5 mm/min	Zeit-Wege-Messung	
13.11.2006		3 Prüfkörper	2 Aufnehmer seitlich	

Lastverformungsdiagramm / 3D-Wabenkern 36 mm



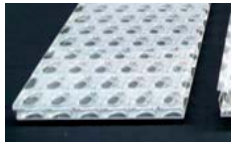
— Prüfkörper 1
— Prüfkörper 2
— Prüfkörper 3
— Mittelwert

Druck Kern				
Ermittlung der Drucksteifigkeit				Referenz Vollplatte
1	Drucksteifigkeit D	$D = dP/dε$	229,310 kN	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Querschnitt volle Fläche	A	54 cm²	Querkontraktion bleibt unberücksichtigt
3	Äquivalenter Druckmodul	$E_{eq} = D / A$	4,246 kN/cm²	Außenabmessungen Querschnitt
4	Vergleich: Vollplatte PC		230	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse
5	Maximallast	P_{max}	4,0 kN	Tatsächlicher E-Modul des Materials
6	Breitennormierte Drucksteifigkeit	D_b	1529 kN/m	Maximale Last vor dem Ausknicken / Versagen
7	Drucksteifigkeit nach Sandwichtheorie	$D = 2 E_s t_s b$	--- kN/m	Wert aus 1 auf Referenzbreite von 1 Meter bezogen
Nur die Deckschichten werden für den Lastabtrag angesetzt [kle05]				
Leichtbaukennzahlen				
8	Gewicht Prüfkörper	absolut	264 g	10%
9	Vergleich: Vollplatte	1,2 g/cm³	2592 g	Durchschnittsgewicht Prüfkörper
10	Verhältnis Drucksteifigkeit zu Gewicht	$δ = D / G$	0,87 kN/g	18%
11	Vergleich: Vollplatte PC		4,79	Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts
Drucksteifigkeit pro Gewicht				
Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen				

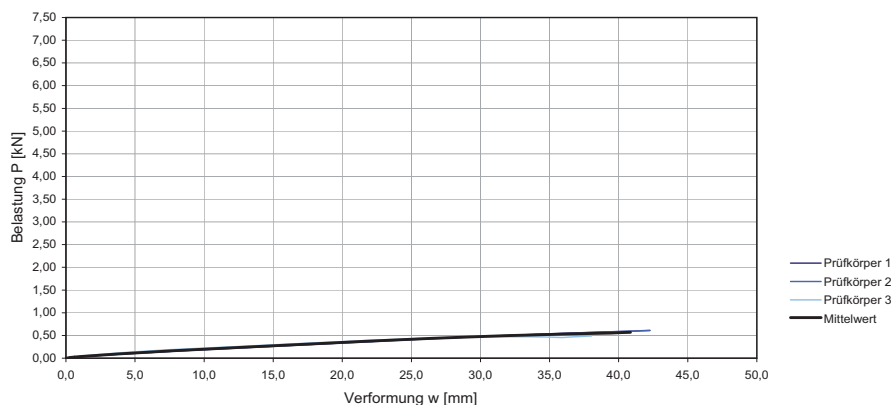
Druck Kern

Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000%	0,000	0,000%	0,000	0,000%	0,000	0,000%	0,000
0,064%	0,010	0,063%	0,040	0,069%	0,040	0,065%	0,030
0,135%	0,030	0,138%	0,040	0,143%	0,060	0,138%	0,043
0,214%	0,040	0,221%	0,050	0,227%	0,070	0,221%	0,053
0,291%	0,040	0,294%	0,060	0,301%	0,180	0,295%	0,093
0,375%	0,070	0,377%	0,190	0,385%	0,340	0,379%	0,200
0,455%	0,230	0,455%	0,350	0,462%	0,510	0,457%	0,363
0,539%	0,430	0,542%	0,570	0,548%	0,710	0,543%	0,570
0,618%	0,620	0,620%	0,760	0,624%	0,900	0,621%	0,760
0,702%	0,830	0,706%	0,970	0,709%	1,100	0,706%	0,967
0,782%	1,030	0,782%	1,160	0,787%	1,280	0,784%	1,157
0,868%	1,240	0,871%	1,370	0,874%	1,480	0,871%	1,363
0,945%	1,420	0,950%	1,560	0,949%	1,650	0,948%	1,543
1,028%	1,620	1,041%	1,780	1,038%	1,850	1,036%	1,750
1,109%	1,810	1,117%	1,950	1,114%	2,020	1,113%	1,927
1,196%	2,010	1,203%	2,150	1,202%	2,200	1,200%	2,120
1,274%	2,190	1,281%	2,330	1,279%	2,370	1,278%	2,297
1,359%	2,380	1,362%	2,500	1,363%	2,540	1,361%	2,473
1,437%	2,550	1,446%	2,680	1,444%	2,700	1,442%	2,643
1,518%	2,720	1,527%	2,850	1,527%	2,870	1,524%	2,813
1,594%	2,880	1,607%	3,020	1,603%	3,010	1,601%	2,970
1,682%	3,060	1,691%	3,190	1,684%	3,160	1,685%	3,137
1,759%	3,210	1,767%	3,330	1,758%	3,300	1,761%	3,280
1,842%	3,370	1,850%	3,490	1,842%	3,450	1,845%	3,437
1,919%	3,510	1,928%	3,630	1,920%	3,580	1,922%	3,573
2,001%	3,660	2,008%	3,770	1,999%	3,710	2,003%	3,713
2,079%	3,800	2,085%	3,910	2,076%	3,830	2,080%	3,847
2,162%	3,940	2,175%	4,060	2,159%	3,960	2,165%	3,987
2,234%	4,050	2,250%	4,170	2,236%	4,070	2,240%	4,097
2,322%	4,190	2,332%	4,300	2,316%	4,180	2,323%	4,223
2,396%	4,300	2,413%	4,420	2,397%	4,300	2,402%	4,340
2,478%	4,420	2,497%	4,540	2,479%	4,400	2,485%	4,453
2,556%	4,520	2,575%	4,640	2,558%	4,500	2,563%	4,553
2,645%	4,650	2,658%	4,750	2,643%	4,600	2,649%	4,667
2,721%	4,740	2,739%	4,860	2,724%	4,700	2,728%	4,767
2,807%	4,850	2,821%	4,950	2,803%	4,780	2,810%	4,860
2,885%	4,940	2,902%	5,050	2,885%	4,870	2,891%	4,953
2,970%	5,040	2,986%	5,140	2,965%	4,940	2,974%	5,040
3,045%	5,110	3,063%	5,220	3,043%	5,020	3,050%	5,117
3,132%	5,200	3,144%	5,300	3,123%	5,090	3,133%	5,197
3,207%	5,270	3,225%	5,380	3,205%	5,170	3,212%	5,273
3,290%	5,340	3,310%	5,460	3,286%	5,230	3,295%	5,343
3,370%	5,400	3,391%	5,530	3,367%	5,290	3,376%	5,407
3,453%	5,460	3,477%	5,600	3,449%	5,340	3,460%	5,467
3,531%	5,490	3,561%	5,670	3,530%	5,380	3,541%	5,513
3,614%	5,520	3,643%	5,720	3,608%	5,390	3,621%	5,543
3,690%	5,510	3,721%	5,760	3,691%	5,390	3,701%	5,553
3,772%	5,490	3,802%	5,780	3,772%	5,320	3,782%	5,530
3,850%	5,430	3,890%	5,800	3,851%	4,990	3,864%	5,407
3,935%	5,320	3,971%	5,780	3,931%	3,850	3,946%	4,983
4,011%	5,020	4,056%	5,740	4,010%	3,760	4,026%	4,840
4,094%	4,640	4,139%	5,660	4,092%	3,750	4,108%	4,683
4,172%	4,430	4,221%	5,550	4,175%	3,750	4,189%	4,577
4,255%	4,300	4,307%	5,410	4,255%	3,730	4,272%	4,480
4,331%	4,200	4,391%	5,250	4,340%	3,700	4,354%	4,383
4,417%	4,110	4,475%	5,070	4,419%	3,640	4,437%	4,273
4,494%	4,020	4,560%	4,890	4,507%	3,540	4,520%	4,150
4,580%	3,950	4,641%	4,700	4,593%	3,180	4,605%	3,943
4,654%	3,880	4,723%	4,540	4,684%	2,920	4,687%	3,780
4,743%	3,840	4,806%	4,410	4,767%	2,840	4,772%	3,697

BV-20		Biegeversuch			
3D-Wabenplatte "clear pep UV PC" 20 mm		800x150x20	1016 g	Polycarbonat	
4-Punkt-Biegeversuch über 750 mm		5 mm/min	Zeit-Wege-Messung		
22.10.2006		3 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte		

Lastverformungsdiagramm BV-20 / 3D-Wabenplatte 20 mm



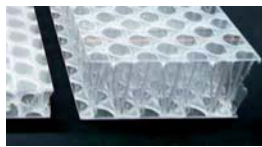
BV-20

Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse				Referenz Vollplatte	(blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)
1	Steigungsgradient m	dP/dw	0,150 kN/cm		Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Durchbiegungsfaktor k	$= 23/1296$			Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]
3	Gesamtsteifigkeit B	$= m \cdot k \cdot l^3$	1124,211 kNcm ²		Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse, Schubverformung eingeschlossen
Vergleichskennwerte Steifigkeit					
4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	$B_0 = B / b$	749 Nm ² /m		breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=15 cm
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	$= E \cdot I_{y0}$	834 Nm ² /m		Berechnet mit I aus tatsächlichen Querschnitt und E des Werksto
5a	Anteil Schubverformung	$g = 1 - B_0 / E \cdot I_{y0}$	10%		Schubverformung des Kerns
5b	Schubmodul G Kernschicht	$= mI / g \cdot 6db$	0,685 kN/cm ²		Berechnung nach [kle05]
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	$B_0 = E_0 \cdot I_0 \cdot d^2 / 2$	745 Nm ² /m		Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]
7	Äquivalentes E-Modul E _{äq}	$E_{äq} = B / I_y$	112 kN/cm ²	49%	Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
7a	Vergleich: Vollplatte PMMA	E	230 kN/cm ²		Tatsächlicher E-Modul des Materials nach Angabe Hersteller
8	Trägheitsmoment absolut, geschätzt	I_y	5,440 cm ⁴	54%	Trägheitsmoment I _y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
8a	Vergleich: Vollplatte	$I_y = h^3 b / 12$	10,000 cm ⁴		Trägheitsmoment I _y bezogen auf einen Referenz-Vollquerschnitt
Leichtbaukennzahlen					
9	Gewicht Platte	absolut	1016 g	35%	Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
9a	Vergleich: Vollplatte PC		2880 g		Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 1,2 g/cm ³

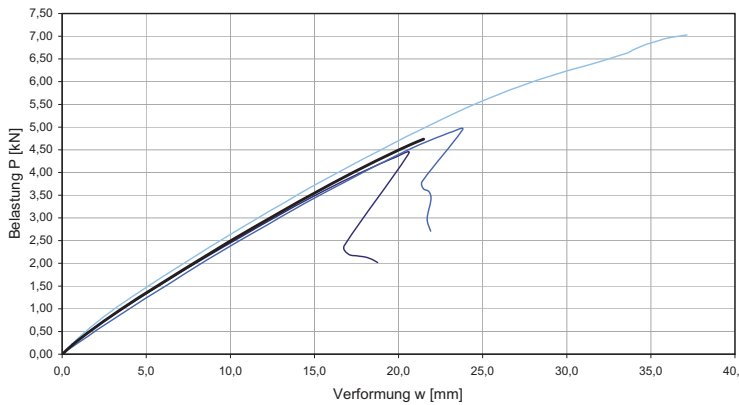
BV-20

Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,354	0,013	0,380	0,015	0,208	0,013	0,314	0,014
0,636	0,022	0,722	0,028	0,512	0,024	0,623	0,024
1,218	0,039	1,382	0,043	0,904	0,037	1,168	0,040
1,942	0,052	2,125	0,058	1,373	0,052	1,813	0,054
2,741	0,069	2,919	0,073	1,869	0,067	2,510	0,070
3,588	0,084	3,804	0,089	2,429	0,080	3,274	0,084
4,510	0,099	4,752	0,104	3,024	0,097	4,095	0,100
5,491	0,114	5,721	0,119	3,657	0,112	4,956	0,115
6,471	0,132	6,700	0,134	4,297	0,127	5,823	0,131
7,451	0,147	7,658	0,149	5,008	0,140	6,705	0,145
8,396	0,162	8,633	0,164	5,753	0,158	7,594	0,161
9,383	0,177	9,593	0,179	6,540	0,171	8,505	0,176
10,355	0,192	10,562	0,192	7,402	0,186	9,440	0,190
11,307	0,207	11,519	0,207	8,512	0,201	10,446	0,205
12,254	0,220	12,453	0,222	9,484	0,216	11,397	0,220
13,220	0,235	13,399	0,238	10,438	0,229	12,352	0,234
14,205	0,251	14,374	0,251	11,401	0,244	13,327	0,248
15,187	0,266	15,352	0,266	12,400	0,257	14,313	0,263
16,153	0,281	16,297	0,279	13,371	0,272	15,273	0,277
17,126	0,296	17,269	0,294	14,328	0,287	16,241	0,292
18,106	0,309	18,235	0,309	15,270	0,300	17,203	0,306
19,092	0,324	19,223	0,322	16,243	0,313	18,186	0,320
20,096	0,339	20,216	0,337	17,213	0,328	19,175	0,335
21,062	0,352	21,174	0,350	18,190	0,341	20,142	0,348
22,069	0,367	22,164	0,365	19,144	0,354	21,126	0,362
23,054	0,382	23,143	0,378	20,096	0,367	22,098	0,376
24,019	0,395	24,106	0,393	21,057	0,380	23,060	0,390
25,003	0,410	25,060	0,406	21,996	0,393	24,019	0,403
25,958	0,423	26,042	0,421	22,928	0,404	24,976	0,416
26,961	0,438	26,988	0,434	23,867	0,415	25,939	0,429
27,909	0,451	27,942	0,447	24,812	0,428	26,888	0,442
28,875	0,462	28,897	0,458	25,733	0,436	27,835	0,452
29,840	0,475	29,826	0,471	26,650	0,445	28,772	0,464
30,776	0,488	30,768	0,482	27,553	0,454	29,699	0,474
31,734	0,499	31,693	0,495	28,460	0,462	30,629	0,485
32,648	0,510	32,607	0,503	29,342	0,464	31,532	0,492
33,587	0,521	33,543	0,516	30,214	0,469	32,448	0,502
34,554	0,534	34,477	0,527	31,091	0,471	33,374	0,510
35,492	0,542	35,410	0,538	31,934	0,473	34,279	0,518
36,417	0,553	36,326	0,549	32,775	0,471	35,173	0,524
37,346	0,559	37,230	0,557	33,608	0,471	36,061	0,529
38,263	0,570	38,157	0,566	34,418	0,469	36,946	0,535
39,190	0,581	39,075	0,577	35,194	0,464	37,820	0,541
40,069	0,590	39,953	0,585	35,889	0,454	38,637	0,543
40,867	0,596	40,769	0,594	36,572	0,467	39,403	0,552
41,599	0,605	41,526	0,600	37,299	0,480	40,141	0,562
42,265	0,611	42,258	0,609	38,028	0,488	40,850	0,570
42,729	0,613	42,849	0,616			28,526	0,410
43,056	0,620	43,166	0,622			28,741	0,414
43,291	0,616	43,446	0,629			28,912	0,415
43,499	0,616	43,673	0,633			29,057	0,416
43,552	0,594	43,785	0,637			29,112	0,410
43,936	0,125	43,789	0,637			29,242	0,254
43,929	0,125	43,783	0,644			29,237	0,256
43,931	0,123	43,783	0,659			29,238	0,261
43,935	0,123	43,782	0,661			29,239	0,261

BV-80		Biegeversuch		
3D-Wabenplatte "clear pep UV PC" 80 mm		800x150x80	1240 g Polycarbonat	
4-Punkt-Biegeversuch über 750 mm		5 mm/min	Zeit-Wege-Messung	
25.07.2007		3 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte	

Lastverformungsdiagramm BV-80 / 3D-Wabenplatte 80 mm



— Prüfkörper 1
— Prüfkörper 2
— Prüfkörper 3
— Mittelwert

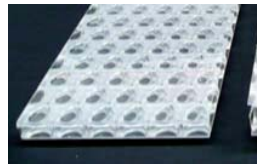
BV-80				
Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse			Referenz Vollplatte	(blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)
1	Steigungsgradient m	dP/dw	2,226 kN/cm	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Durchbiegungsfaktor k	= 23/1296		Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]
3	Gesamtsteifigkeit B	= m k l³	16663,220 kNcm²	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse, Schubverformung eingeschlossen
Vergleichskennwerte Steifigkeit				
4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	B _s = B / b	11109 Nm²/m	breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=15 cm
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	= E I _{y0}	16100 Nm²/m	Berechnet mit I aus tatsächlichen Querschnitt und E des Werkstoffs
5a	Anteil Schubverformung	γ = 1 - B _s / E I _{y0}	31%	Schubverformung des Kerns
5b	Schubmodul G Kernschicht	= ml / γ 6db	0,767 kN/cm²	Berechnung nach [kle05]
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	B _s = E _D t _D d² / 2	13993 Nm²/m	Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]
7	Äquivalentes E-Modul E _{Äq}	E _{Äq} = B / I _y	26 kN/cm²	11% Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
7a	Vergleich: Vollplatte PMMA	E	230 kN/cm²	Tatsächlicher E-Modul des Materials nach Angabe Hersteller
8	Trägheitsmoment absolut, geschätzt	I _y	105,000 cm⁴	16% Trägheitsmoment I y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
8a	Vergleich: Vollplatte	I _y = h³b / 12	640,000 cm⁴	Trägheitsmoment I y bezogen auf einen Referenz-Vollquerschnitt
Leichtbaukennzahlen				
9	Gewicht Platte	absolut	1240 g	11% Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
9a	Vergleich: Vollplatte PC		11520 g	Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 1,2 g/cm³
10	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	b = B / G	13,44	105% Biegesteifigkeit pro Gewicht
10a	Vergleich: Vollplatte GFK		12,78	Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

BV-80

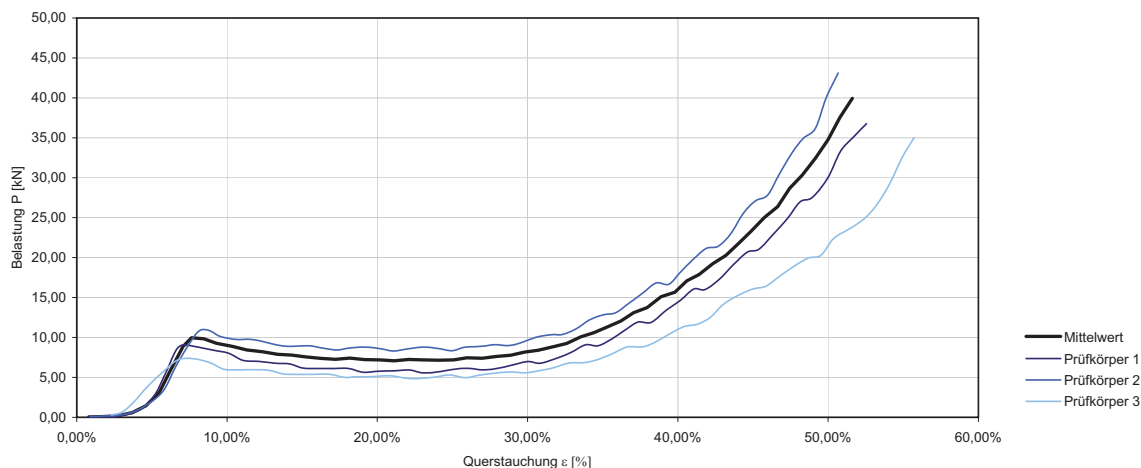
Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,370	0,120	0,478	0,130	0,970	0,360	0,606	0,203
0,992	0,320	1,348	0,350	1,682	0,590	1,340	0,420
1,752	0,540	2,254	0,580	2,459	0,820	2,155	0,647
2,603	0,760	3,151	0,800	3,296	1,050	3,016	0,870
3,495	0,970	4,043	1,010	4,212	1,280	3,917	1,087
4,395	1,190	4,958	1,230	5,106	1,500	4,820	1,307
5,290	1,400	5,873	1,440	6,013	1,710	5,725	1,517
6,179	1,600	6,736	1,640	6,936	1,930	6,617	1,723
7,078	1,810	7,632	1,850	7,849	2,150	7,519	1,937
7,967	2,010	8,542	2,060	8,738	2,350	8,415	2,140
8,834	2,200	9,415	2,250	9,660	2,560	9,303	2,337
9,706	2,390	10,304	2,450	10,556	2,760	10,189	2,533
10,587	2,570	11,178	2,630	11,458	2,960	11,074	2,720
11,455	2,760	12,073	2,820	12,366	3,160	11,964	2,913
12,325	2,940	12,979	3,020	13,269	3,350	12,858	3,103
13,186	3,130	13,852	3,200	14,178	3,550	13,738	3,293
14,059	3,300	14,721	3,380	15,086	3,740	14,622	3,473
14,934	3,470	15,615	3,560	15,993	3,920	15,514	3,650
15,808	3,640	16,500	3,730	16,896	4,100	16,401	3,823
16,656	3,800	17,365	3,900	17,804	4,280	17,275	3,993
17,509	3,960	18,230	4,070	18,699	4,450	18,146	4,160
18,345	4,100	19,097	4,230	19,571	4,620	19,004	4,317
19,157	4,230	19,960	4,390	20,463	4,790	19,860	4,470
19,913	4,350	20,812	4,540	21,349	4,950	20,691	4,613
20,611	4,420	21,626	4,670	22,240	5,110	21,492	4,733
16,767	2,390	22,430	4,790	23,138	5,270		
17,033	2,200	23,219	4,900	24,012	5,420		
17,627	2,160	23,805	4,940	24,886	5,560		
18,209	2,120	21,400	3,800	25,761	5,690		
18,759	2,020	21,482	3,640	26,634	5,820		
		21,809	3,580	27,510	5,940		
		21,930	3,410	28,376	6,050		
		21,697	2,980	29,233	6,150		
		21,913	2,710	30,082	6,240		
		22,375	2,550	30,907	6,330		
				31,687	6,410		
				32,398	6,490		
				33,078	6,570		
				33,619	6,630		
				33,992	6,710		
				34,370	6,770		
				34,721	6,820		
				35,073	6,860		
				35,420	6,900		
				35,775	6,940		
				36,122	6,970		
				36,466	6,990		
				36,806	7,010		
				37,153	7,030		

Im Anfangsbereich der Kurve wird das Material erst in Position "gezogen". Die Meßaufnehmer werden anfangs ungleichmässig beansprucht.

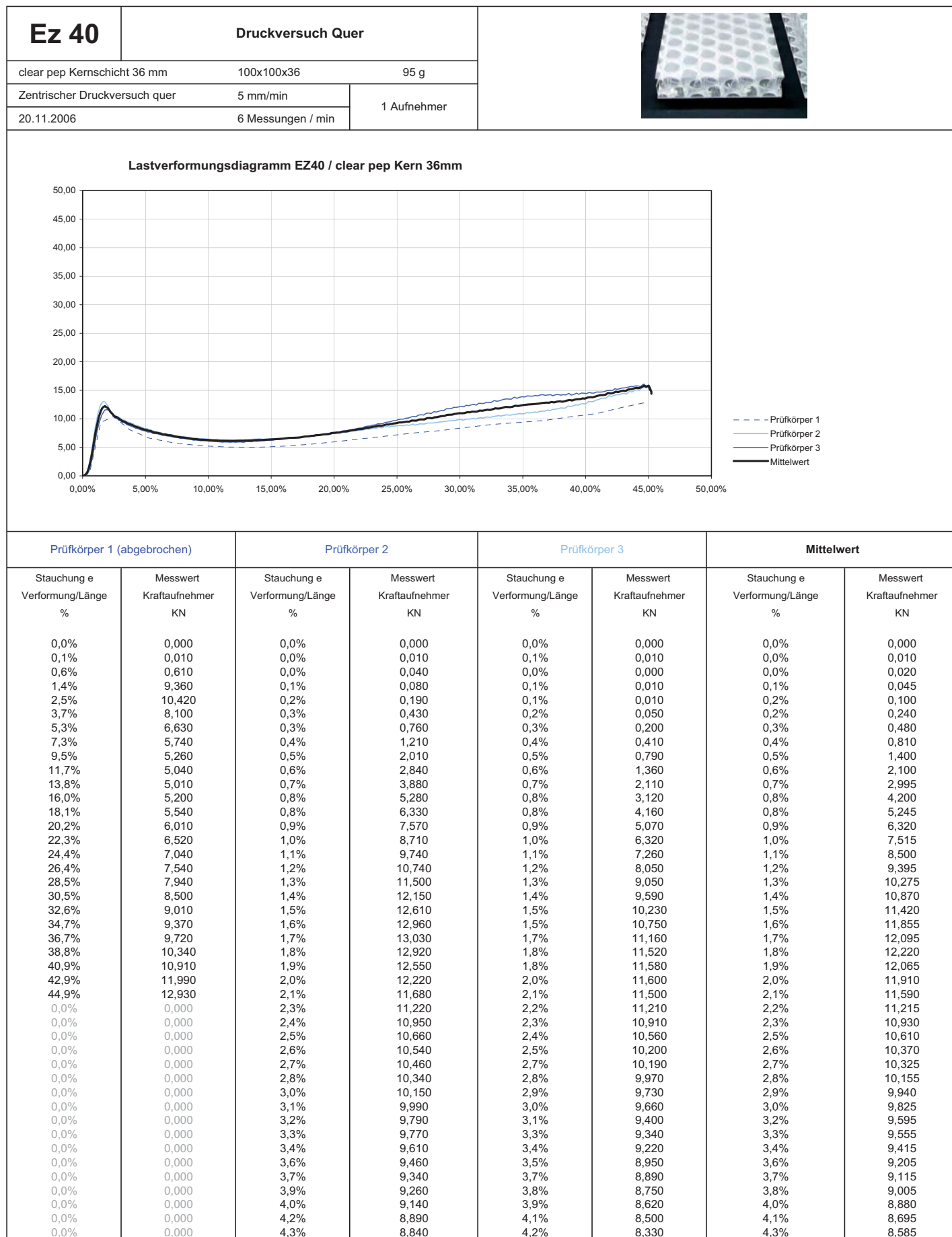
Ez 20		Druckversuch in Z-Richtung		
clear pep Kernschicht 16 mm		100x100x16	92 g	
Zentrischer Druckversuch quer		1 mm/min	1 Aufnehmer	
07.02.2007		6 Messungen / min		

Lastverformungsdiagramm EZ / clear pep Kern 16mm



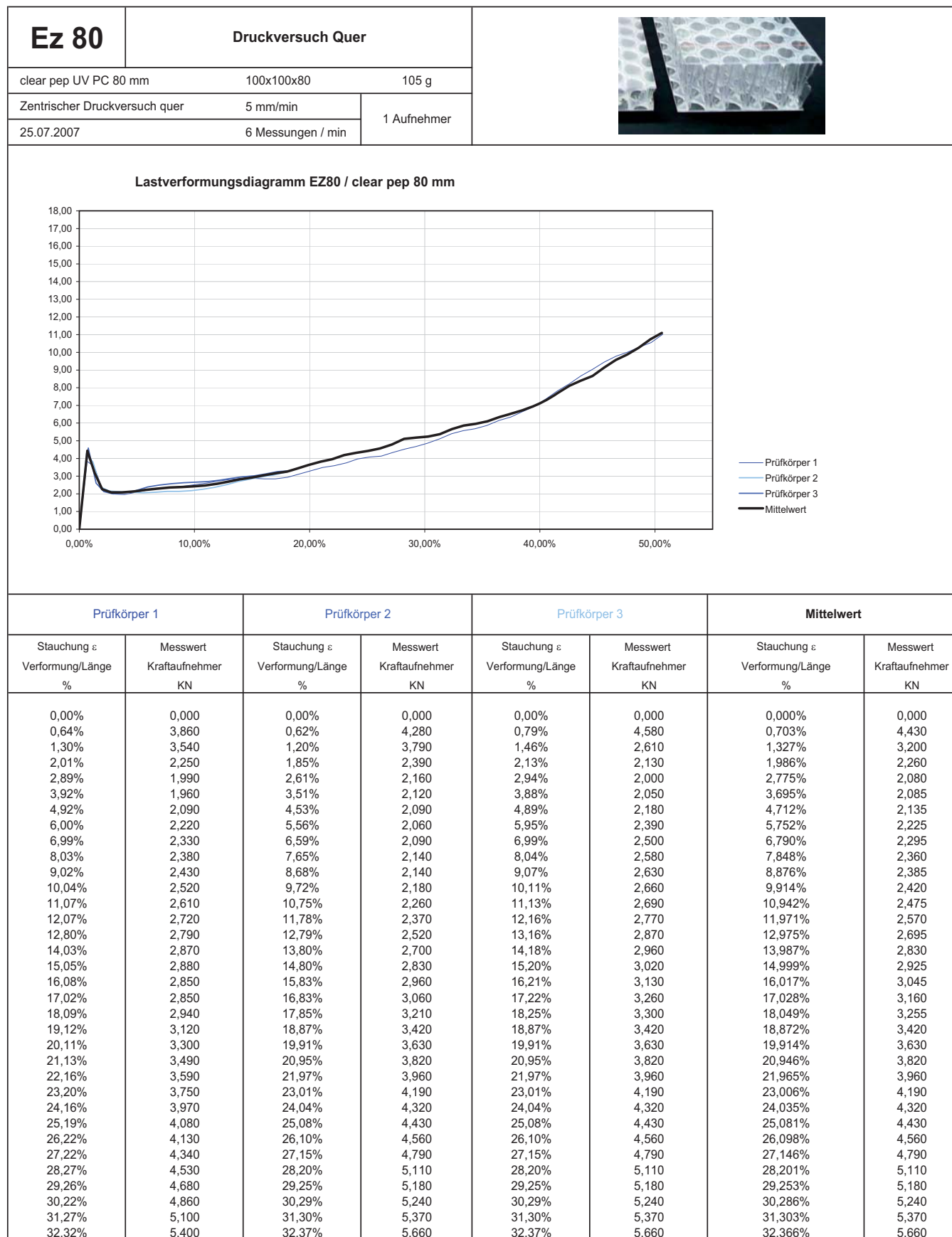
Meßwerte Prüfkörper 1		Meßwerte Prüfkörper 2		Meßwerte Prüfkörper 3		Mittelwerte (aus 1 und 2)	
Stauchung e Verformung/Länge %	Kraft F Kraftaufnehmer KN	Stauchung e Verformung/Länge %	Kraft F Kraftaufnehmer KN	Stauchung e Verformung/Länge %	Kraft F Kraftaufnehmer KN	Stauchung e Verformung/Länge %	Kraft F Kraftaufnehmer KN
0,8%	0,010	0,9%	0,120	2,3%	0,300	0,8%	0,065
1,6%	0,030	1,8%	0,170	3,0%	0,630	1,7%	0,100
2,6%	0,110	2,8%	0,260	3,7%	1,810	2,7%	0,185
3,6%	0,470	3,8%	0,690	4,7%	3,860	3,7%	0,580
4,4%	1,150	4,8%	1,770	5,7%	5,680	4,6%	1,460
5,2%	2,890	5,8%	3,390	6,7%	7,200	5,5%	3,140
5,9%	5,430	6,6%	6,310	7,8%	7,350	6,2%	5,870
6,6%	8,380	7,5%	9,350	8,9%	6,830	7,1%	8,865
7,1%	9,060	8,2%	10,880	9,8%	6,030	7,6%	9,970
8,1%	8,790	8,8%	10,860	10,8%	5,950	8,5%	9,825
9,1%	8,410	9,5%	10,140	11,7%	5,960	9,3%	9,275
10,1%	8,020	10,6%	9,760	12,8%	5,880	10,3%	8,890
11,1%	7,130	11,6%	9,750	13,8%	5,430	11,3%	8,440
12,1%	7,010	12,6%	9,400	14,6%	5,370	12,4%	8,205
13,2%	6,780	13,5%	8,990	15,8%	5,370	13,4%	7,885
14,2%	6,690	14,4%	8,890	16,8%	5,390	14,3%	7,790
15,1%	6,180	15,4%	8,970	17,8%	5,000	15,2%	7,575
16,1%	6,120	16,5%	8,640	18,6%	5,070	16,3%	7,380
17,1%	6,110	17,3%	8,430	19,7%	5,100	17,2%	7,270
18,1%	6,120	18,3%	8,710	20,9%	5,210	18,2%	7,415
19,1%	5,650	19,3%	8,790	21,9%	4,900	19,2%	7,220
20,1%	5,780	20,2%	8,590	22,7%	4,850	20,2%	7,185
21,2%	5,830	21,1%	8,310	23,9%	5,050	21,1%	7,070
22,2%	5,920	22,0%	8,570	24,8%	5,310	22,1%	7,245
23,1%	5,570	23,1%	8,800	25,9%	4,970	23,1%	7,185
24,1%	5,700	24,1%	8,610	26,7%	5,270	24,1%	7,155
25,2%	6,040	25,0%	8,350	27,7%	5,510	25,1%	7,195
26,1%	6,130	25,9%	8,800	28,9%	5,690	26,0%	7,465
27,1%	5,940	26,9%	8,870	29,9%	5,570	27,0%	7,405
28,1%	6,160	27,8%	9,090	30,7%	5,810	27,9%	7,625
29,0%	6,560	28,7%	8,980	31,7%	6,200	28,9%	7,770
30,0%	6,990	29,6%	9,360	32,7%	6,800	29,8%	8,175
30,9%	6,770	30,6%	10,030	33,8%	6,860	30,7%	8,400
31,9%	7,380	31,6%	10,340	34,6%	7,170	31,7%	8,860
32,9%	8,110	32,3%	10,380	35,6%	7,910	32,6%	9,245
33,9%	9,070	33,2%	11,080	36,6%	8,790	33,5%	10,075
34,7%	8,970	34,2%	12,240	37,6%	8,820	34,4%	10,605
35,6%	9,850	35,0%	12,830	38,4%	9,350	35,3%	11,340
36,6%	11,030	35,9%	13,100	39,4%	10,360	36,2%	12,065
37,4%	11,930	36,8%	14,280	40,4%	11,340	37,1%	13,105

38,2%	11,900	37,7%	15,600	41,3%	11,690	38,0%	13,750
39,2%	13,400	38,5%	16,810	42,2%	12,560	38,9%	15,105
40,2%	14,690	39,4%	16,660	43,0%	14,180	39,8%	15,675
41,1%	16,070	40,2%	18,150	44,1%	15,360	40,6%	17,110
41,8%	16,000	41,0%	19,760	45,0%	16,060	41,4%	17,880
42,8%	17,310	41,9%	21,140	45,9%	16,440	42,3%	19,225
43,7%	19,110	42,7%	21,430	46,8%	17,710	43,2%	20,270
44,6%	20,680	43,5%	22,970	47,8%	18,980	44,1%	21,825
45,4%	21,050	44,3%	25,520	48,7%	19,960	44,9%	23,285
46,4%	22,950	45,2%	27,090	49,5%	20,300	45,8%	25,020
47,3%	24,960	46,0%	27,830	50,4%	22,380	46,6%	26,395
48,1%	26,980	46,7%	30,380	51,4%	23,630	47,4%	28,680
49,0%	27,530	47,6%	33,140	52,4%	24,820	48,3%	30,335
50,0%	29,980	48,4%	34,940	53,2%	26,460	49,2%	32,460
50,8%	33,350	49,2%	36,180	54,0%	29,010	50,0%	34,765
51,7%	35,140	49,9%	39,970	55,0%	32,620	50,8%	37,555
52,6%	36,760	50,7%	43,110	55,7%	35,030	51,6%	39,935

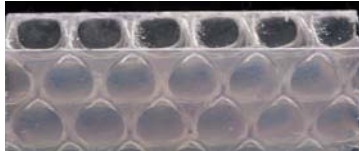


0,0%	0,000	4,5%	8,730	4,4%	8,280	4,4%	8,505
0,0%	0,000	4,6%	8,580	4,5%	8,170	4,6%	8,375
0,0%	0,000	4,8%	8,480	4,7%	8,010	4,7%	8,245
0,0%	0,000	4,9%	8,300	4,9%	7,930	4,9%	8,115
0,0%	0,000	5,1%	8,300	5,0%	7,840	5,1%	8,070
0,0%	0,000	5,3%	8,150	5,2%	7,690	5,2%	7,920
0,0%	0,000	5,5%	8,010	5,4%	7,680	5,4%	7,845
0,0%	0,000	5,7%	7,830	5,6%	7,460	5,6%	7,645
0,0%	0,000	5,8%	7,790	5,7%	7,400	5,8%	7,595
0,0%	0,000	6,0%	7,670	5,9%	7,380	6,0%	7,525
0,0%	0,000	6,3%	7,560	6,2%	7,260	6,2%	7,410
0,0%	0,000	6,4%	7,390	6,3%	7,130	6,4%	7,260
0,0%	0,000	6,6%	7,430	6,5%	7,100	6,6%	7,265
0,0%	0,000	6,9%	7,260	6,7%	7,000	6,8%	7,130
0,0%	0,000	7,1%	7,240	6,9%	6,970	7,0%	7,105
0,0%	0,000	7,3%	7,110	7,2%	6,830	7,2%	6,970
0,0%	0,000	7,5%	7,020	7,3%	6,750	7,4%	6,885
0,0%	0,000	7,7%	6,960	7,6%	6,720	7,6%	6,840
0,0%	0,000	7,9%	6,900	7,8%	6,570	7,8%	6,735
0,0%	0,000	8,1%	6,850	8,0%	6,580	8,0%	6,715
0,0%	0,000	8,3%	6,780	8,2%	6,500	8,2%	6,640
0,0%	0,000	8,5%	6,750	8,4%	6,430	8,5%	6,590
0,0%	0,000	8,7%	6,610	8,6%	6,390	8,7%	6,500
0,0%	0,000	8,9%	6,630	8,8%	6,270	8,9%	6,450
0,0%	0,000	9,2%	6,590	9,0%	6,280	9,1%	6,435
0,0%	0,000	9,4%	6,480	9,2%	6,230	9,3%	6,355
0,0%	0,000	9,6%	6,520	9,4%	6,150	9,5%	6,335
0,0%	0,000	9,8%	6,480	9,7%	6,170	9,7%	6,325
0,0%	0,000	10,0%	6,440	9,9%	6,140	9,9%	6,290
0,0%	0,000	10,2%	6,410	10,1%	6,050	10,1%	6,230
0,0%	0,000	10,4%	6,400	10,3%	6,060	10,3%	6,230
0,0%	0,000	10,6%	6,420	10,5%	6,020	10,6%	6,220
0,0%	0,000	10,8%	6,360	10,7%	5,990	10,8%	6,175
0,0%	0,000	11,0%	6,320	10,9%	5,970	11,0%	6,145
0,0%	0,000	11,3%	6,360	11,1%	5,910	11,2%	6,135
0,0%	0,000	11,5%	6,330	11,3%	5,950	11,4%	6,140
0,0%	0,000	11,7%	6,330	11,5%	5,920	11,6%	6,125
0,0%	0,000	11,9%	6,340	11,7%	5,900	11,8%	6,120
0,0%	0,000	12,1%	6,310	12,0%	5,940	12,0%	6,125
0,0%	0,000	12,3%	6,350	12,2%	5,890	12,2%	6,120
0,0%	0,000	12,5%	6,390	12,4%	5,940	12,4%	6,165
0,0%	0,000	12,7%	6,310	12,6%	5,950	12,7%	6,130
0,0%	0,000	12,9%	6,400	12,8%	5,880	12,9%	6,140
0,0%	0,000	13,1%	6,380	13,0%	6,020	13,1%	6,200
0,0%	0,000	13,3%	6,400	13,2%	6,010	13,3%	6,205
0,0%	0,000	13,6%	6,440	13,4%	5,990	13,5%	6,215
0,0%	0,000	13,8%	6,430	13,6%	6,080	13,7%	6,255
0,0%	0,000	14,0%	6,500	13,9%	6,050	13,9%	6,275
0,0%	0,000	14,2%	6,440	14,1%	6,120	14,2%	6,280
0,0%	0,000	14,4%	6,430	14,3%	6,160	14,3%	6,295
0,0%	0,000	14,6%	6,470	14,5%	6,160	14,6%	6,315
0,0%	0,000	14,9%	6,480	14,7%	6,260	14,8%	6,370
0,0%	0,000	15,1%	6,520	14,9%	6,250	15,0%	6,385
0,0%	0,000	15,3%	6,540	15,1%	6,260	15,2%	6,400
0,0%	0,000	15,5%	6,550	15,4%	6,390	15,4%	6,470
0,0%	0,000	15,7%	6,530	15,6%	6,360	15,6%	6,445
0,0%	0,000	15,9%	6,590	15,7%	6,420	15,8%	6,505
0,0%	0,000	16,1%	6,550	16,0%	6,520	16,0%	6,535
0,0%	0,000	16,3%	6,690	16,2%	6,540	16,2%	6,615
0,0%	0,000	16,6%	6,680	16,4%	6,640	16,5%	6,660
0,0%	0,000	16,8%	6,690	16,6%	6,630	16,7%	6,660
0,0%	0,000	17,0%	6,720	16,8%	6,650	16,9%	6,685
0,0%	0,000	17,2%	6,690	17,0%	6,730	17,1%	6,710
0,0%	0,000	17,4%	6,770	17,2%	6,730	17,3%	6,750
0,0%	0,000	17,6%	6,850	17,4%	6,830	17,5%	6,840
0,0%	0,000	17,8%	6,870	17,7%	6,930	17,7%	6,900
0,0%	0,000	18,0%	6,930	17,9%	6,930	18,0%	6,930
0,0%	0,000	18,2%	6,960	18,1%	7,040	18,2%	7,000
0,0%	0,000	18,4%	7,000	18,3%	7,060	18,4%	7,030
0,0%	0,000	18,7%	7,090	18,5%	7,170	18,6%	7,130
0,0%	0,000	18,9%	7,100	18,7%	7,200	18,8%	7,150
0,0%	0,000	19,1%	7,210	18,9%	7,220	19,0%	7,215
0,0%	0,000	19,3%	7,220	19,2%	7,330	19,2%	7,275
0,0%	0,000	19,5%	7,200	19,4%	7,380	19,4%	7,290
0,0%	0,000	19,7%	7,310	19,5%	7,380	19,6%	7,345
0,0%	0,000	19,9%	7,430	19,8%	7,600	19,8%	7,515
0,0%	0,000	20,1%	7,450	20,0%	7,610	20,1%	7,530
0,0%	0,000	20,3%	7,510	20,2%	7,660	20,3%	7,585
0,0%	0,000	20,5%	7,510	20,4%	7,680	20,4%	7,595
0,0%	0,000	20,7%	7,680	20,6%	7,820	20,7%	7,750
0,0%	0,000	20,9%	7,650	20,8%	7,890	20,9%	7,770
0,0%	0,000	21,1%	7,690	21,0%	7,940	21,1%	7,815
0,0%	0,000	21,3%	7,840	21,2%	8,040	21,3%	7,940
0,0%	0,000	21,6%	7,870	21,4%	8,130	21,5%	8,000
0,0%	0,000	21,7%	7,920	21,6%	8,200	21,7%	8,060
0,0%	0,000	22,0%	8,000	21,8%	8,320	21,9%	8,160
0,0%	0,000	22,2%	8,000	22,0%	8,390	22,1%	8,195
0,0%	0,000	22,4%	8,080	22,2%	8,400	22,3%	8,240
0,0%	0,000	22,6%	8,200	22,4%	8,600	22,5%	8,400
0,0%	0,000	22,8%	8,170	22,7%	8,710	22,7%	8,440
0,0%	0,000	23,0%	8,290	22,9%	8,740	22,9%	8,515
0,0%	0,000	23,2%	8,340	23,1%	8,910	23,1%	8,625
0,0%	0,000	23,4%	8,390	23,3%	8,920	23,3%	8,655
0,0%	0,000	23,6%	8,520	23,5%	9,140	23,6%	8,830
0,0%	0,000	23,8%	8,400	23,7%	9,120	23,7%	8,760
0,0%	0,000	24,0%	8,580	23,9%	9,160	23,9%	8,870
0,0%	0,000	24,2%	8,640	24,1%	9,390	24,2%	9,015
0,0%	0,000	24,4%	8,560	24,3%	9,420	24,3%	8,990
0,0%	0,000	24,6%	8,730	24,5%	9,490	24,5%	9,110
0,0%	0,000	24,8%	8,710	24,7%	9,660	24,7%	9,185
0,0%	0,000	25,0%	8,800	24,9%	9,680	25,0%	9,240
0,0%	0,000	25,2%	8,870	25,1%	9,870	25,2%	9,370
0,0%	0,000	25,4%	8,780	25,3%	9,950	25,4%	9,365

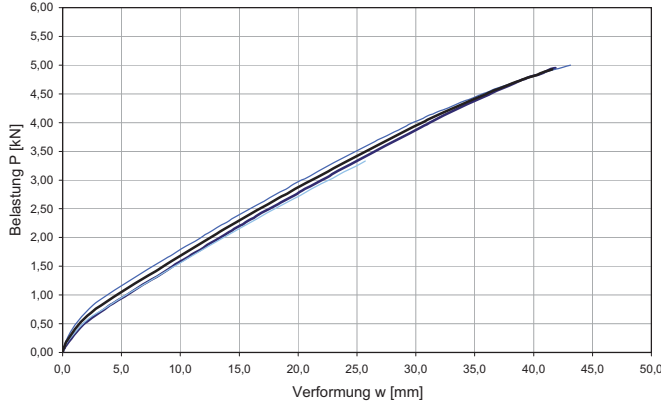
0,0%	0,000	25,6%	8,890	25,5%	9,940	25,6%	9,415
0,0%	0,000	25,8%	8,920	25,7%	10,100	25,8%	9,510
0,0%	0,000	26,0%	8,850	25,9%	10,140	26,0%	9,495
0,0%	0,000	26,3%	9,080	26,1%	10,300	26,2%	9,690
0,0%	0,000	26,4%	8,900	26,3%	10,440	26,4%	9,670
0,0%	0,000	26,6%	9,000	26,5%	10,350	26,5%	9,675
0,0%	0,000	26,8%	9,120	26,7%	10,660	26,8%	9,890
0,0%	0,000	27,0%	9,080	26,9%	10,710	27,0%	9,895
0,0%	0,000	27,2%	9,100	27,1%	10,650	27,2%	9,875
0,0%	0,000	27,4%	9,270	27,3%	10,950	27,4%	10,110
0,0%	0,000	27,6%	9,270	27,5%	11,030	27,6%	10,150
0,0%	0,000	27,8%	9,270	27,7%	10,900	27,8%	10,085
0,0%	0,000	28,0%	9,300	27,9%	11,250	28,0%	10,275
0,0%	0,000	28,2%	9,390	28,1%	11,200	28,2%	10,295
0,0%	0,000	28,4%	9,450	28,3%	11,330	28,4%	10,390
0,0%	0,000	28,6%	9,490	28,5%	11,460	28,6%	10,475
0,0%	0,000	28,8%	9,570	28,7%	11,450	28,8%	10,510
0,0%	0,000	29,1%	9,630	28,9%	11,770	29,0%	10,700
0,0%	0,000	29,2%	9,660	29,1%	11,760	29,2%	10,710
0,0%	0,000	29,5%	9,700	29,3%	11,780	29,4%	10,740
0,0%	0,000	29,7%	9,710	29,5%	12,010	29,6%	10,860
0,0%	0,000	29,9%	9,860	29,7%	12,010	29,8%	10,935
0,0%	0,000	30,1%	9,880	29,9%	12,090	30,0%	10,985
0,0%	0,000	30,2%	9,750	30,1%	12,210	30,2%	10,980
0,0%	0,000	30,4%	9,920	30,3%	12,100	30,4%	11,010
0,0%	0,000	30,7%	9,930	30,5%	12,380	30,6%	11,155
0,0%	0,000	30,8%	9,980	30,7%	12,310	30,8%	11,145
0,0%	0,000	31,1%	10,100	30,9%	12,450	31,0%	11,275
0,0%	0,000	31,3%	9,960	31,1%	12,540	31,2%	11,250
0,0%	0,000	31,4%	10,120	31,3%	12,400	31,4%	11,260
0,0%	0,000	31,7%	10,200	31,5%	12,720	31,6%	11,460
0,0%	0,000	31,8%	10,130	31,7%	12,690	31,8%	11,410
0,0%	0,000	32,1%	10,330	31,9%	12,690	32,0%	11,510
0,0%	0,000	32,3%	10,290	32,1%	12,920	32,2%	11,605
0,0%	0,000	32,4%	10,270	32,3%	12,830	32,4%	11,550
0,0%	0,000	32,7%	10,420	32,5%	12,880	32,6%	11,650
0,0%	0,000	32,9%	10,490	32,7%	13,200	32,8%	11,845
0,0%	0,000	33,1%	10,540	32,9%	13,070	33,0%	11,805
0,0%	0,000	33,3%	10,490	33,1%	13,140	33,2%	11,815
0,0%	0,000	33,5%	10,570	33,3%	13,310	33,4%	11,940
0,0%	0,000	33,7%	10,720	33,5%	13,430	33,6%	12,075
0,0%	0,000	33,9%	10,640	33,7%	13,490	33,8%	12,065
0,0%	0,000	34,1%	10,660	33,9%	13,440	34,0%	12,050
0,0%	0,000	34,3%	10,780	34,1%	13,440	34,2%	12,110
0,0%	0,000	34,5%	10,800	34,3%	13,790	34,4%	12,295
0,0%	0,000	34,7%	10,910	34,5%	13,590	34,6%	12,250
0,0%	0,000	34,9%	10,880	34,7%	13,760	34,8%	12,320
0,0%	0,000	35,1%	10,900	34,9%	13,880	35,0%	12,390
0,0%	0,000	35,3%	11,090	35,1%	13,830	35,2%	12,460
0,0%	0,000	35,5%	11,030	35,4%	14,020	35,4%	12,525
0,0%	0,000	35,7%	11,090	35,6%	13,980	35,7%	12,535
0,0%	0,000	36,0%	11,200	35,8%	13,960	35,9%	12,580
0,0%	0,000	36,1%	11,130	36,0%	14,100	36,1%	12,615
0,0%	0,000	36,3%	11,290	36,2%	14,010	36,3%	12,650
0,0%	0,000	36,6%	11,340	36,4%	14,160	36,5%	12,750
0,0%	0,000	36,8%	11,350	36,6%	14,250	36,7%	12,800
0,0%	0,000	37,0%	11,550	36,8%	14,120	36,9%	12,835
0,0%	0,000	37,2%	11,440	37,0%	14,180	37,1%	12,810
0,0%	0,000	37,4%	11,630	37,2%	14,250	37,3%	12,940
0,0%	0,000	37,6%	11,700	37,4%	14,030	37,5%	12,865
0,0%	0,000	37,8%	11,760	37,6%	14,240	37,7%	13,000
0,0%	0,000	38,0%	11,910	37,9%	14,250	37,9%	13,080
0,0%	0,000	38,2%	11,880	38,0%	14,140	38,1%	13,010
0,0%	0,000	38,4%	11,880	38,2%	14,240	38,3%	13,060
0,0%	0,000	38,6%	12,240	38,4%	14,190	38,5%	13,215
0,0%	0,000	38,8%	12,150	38,7%	14,460	38,7%	13,305
0,0%	0,000	39,0%	12,260	38,8%	14,150	38,9%	13,205
0,0%	0,000	39,2%	12,440	39,0%	14,280	39,1%	13,360
0,0%	0,000	39,4%	12,400	39,3%	14,500	39,3%	13,450
0,0%	0,000	39,6%	12,610	39,5%	14,300	39,5%	13,455
0,0%	0,000	39,8%	12,630	39,7%	14,510	39,8%	13,570
0,0%	0,000	40,0%	12,600	39,9%	14,480	39,9%	13,540
0,0%	0,000	40,2%	13,030	40,1%	14,430	40,1%	13,730
0,0%	0,000	40,4%	12,980	40,3%	14,630	40,4%	13,805
0,0%	0,000	40,6%	13,020	40,5%	14,500	40,5%	13,760
0,0%	0,000	40,8%	13,280	40,7%	14,510	40,8%	13,895
0,0%	0,000	41,0%	13,380	40,9%	14,710	41,0%	14,045
0,0%	0,000	41,2%	13,600	41,1%	14,680	41,2%	14,140
0,0%	0,000	41,4%	13,630	41,3%	14,700	41,4%	14,165
0,0%	0,000	41,6%	13,620	41,5%	14,780	41,6%	14,200
0,0%	0,000	41,9%	14,100	41,7%	14,970	41,8%	14,535
0,0%	0,000	42,1%	13,910	41,9%	14,980	42,0%	14,445
0,0%	0,000	42,2%	14,060	42,1%	14,940	42,2%	14,500
0,0%	0,000	42,5%	14,250	42,3%	15,270	42,4%	14,760
0,0%	0,000	42,7%	14,210	42,5%	15,170	42,6%	14,690
0,0%	0,000	42,9%	14,400	42,7%	15,290	42,8%	14,845
0,0%	0,000	43,1%	14,480	42,9%	15,400	43,0%	14,940
0,0%	0,000	43,2%	14,320	43,1%	15,420	43,2%	14,870
0,0%	0,000	43,5%	14,790	43,3%	15,520	43,4%	15,155
0,0%	0,000	43,7%	14,710	43,6%	15,640	43,6%	15,175
0,0%	0,000	43,9%	14,970	43,8%	15,660	43,8%	15,315
0,0%	0,000	44,1%	15,120	44,0%	15,780	44,0%	15,450
0,0%	0,000	44,3%	14,990	44,2%	15,750	44,2%	15,370
0,0%	0,000	44,5%	15,380	44,4%	15,640	44,4%	15,510
0,0%	0,000	44,7%	15,530	44,6%	16,080	44,7%	15,805
0,0%	0,000	44,9%	15,430	44,8%	15,790	44,8%	15,610
0,0%	0,000	45,1%	15,880	45,0%	15,760	45,0%	15,820
0,0%	0,000	45,2%	15,410	45,0%	15,090	45,1%	15,250
0,0%	0,000	45,2%	14,780	45,2%	14,780	45,2%	14,780
0,0%	0,000	45,2%	14,380	45,2%	14,380	45,2%	14,380



33,34%	5,570	33,38%	5,860	33,38%	5,860	33,384%	5,860
34,37%	5,680	34,41%	5,960	34,41%	5,960	34,413%	5,960
35,41%	5,870	35,43%	6,100	35,43%	6,100	35,428%	6,100
36,46%	6,150	36,49%	6,340	36,49%	6,340	36,494%	6,340
37,48%	6,340	37,52%	6,540	37,52%	6,540	37,521%	6,540
38,51%	6,650	38,53%	6,730	38,53%	6,730	38,528%	6,730
39,51%	6,940	39,52%	6,980	39,52%	6,980	39,523%	6,980
40,54%	7,370	40,54%	7,300	40,54%	7,300	40,539%	7,300
41,54%	7,830	41,54%	7,700	41,54%	7,700	41,538%	7,700
42,56%	8,220	42,56%	8,110	42,56%	8,110	42,558%	8,110
43,57%	8,670	43,56%	8,400	43,56%	8,400	43,555%	8,400
44,58%	9,040	44,57%	8,660	44,57%	8,660	44,566%	8,660
45,60%	9,450	45,58%	9,140	45,58%	9,140	45,578%	9,140
46,61%	9,780	46,59%	9,570	46,59%	9,570	46,589%	9,570
47,62%	10,010	47,59%	9,880	47,59%	9,880	47,587%	9,880
48,65%	10,300	48,59%	10,260	48,59%	10,260	48,592%	10,260
49,66%	10,550	49,60%	10,740	49,60%	10,740	49,596%	10,740
50,68%	11,030	50,60%	11,100	50,60%	11,100	50,596%	11,100

Biegung GFK-PC		Biegeversuch			
2x 1,5mm GFK 30% + 3D-Wabenkern 36mm längs		800x150x39	1010 g		GFK/PC
4-Punkt-Biegeversuch über 750 mm		5 mm/min	Kleber: Araldite 2026		
16.04.2007		3 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte		

Lastverformungsdiagramm
3D-Wabenplatte mit GFK-Deckschichten 39mm



— Prüfkörper 1
— Prüfkörper 2
— prüfkörper 3
— Mittelwert

Biegung GFK-PC					
<u>Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse</u>		Referenz Vollplatte (blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)			
1	Steigungsgradient m	dP/dw	1,243 kN/cm	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)	
2	Durchbiegungsfaktor k	$= 23/1296$		Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]	
3	Gesamtsteifigkeit B	$= m \cdot k \cdot l^3$	9304,153 kNcm²	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse, Schubverformung eingeschlossen	
<u>Vergleichskennwerte Steifigkeit</u>					
4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	$B_s = B / b$	6203 Nm²/m	breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=15 cm	
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	$= B_s + B_k$	7987 Nm²/m	Berechnet mit I aus tatsächlichen Querschnitt und E des Werkstoffs	
5a	Anteil Schubverformung	$\gamma = 1 - B_s / E \cdot I_y$	22%	Schubverformung des Kerns und der Schubfuge	
5b	Schubmodul G	$= mI / \gamma \cdot 6db$	1,236 kN/cm²	Berechnung nach [kle05]	
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	$B_s = E_s \cdot t_s \cdot d^2 / 2$	7594 Nm²/m	Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]	
7	Äquivalentes E-Modul Eäq	$E_{äq} = B / I_y$	125 kN/cm²	17%	Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
7a	Vergleich: Vollplatte GFK	E	720 kN/cm²		Tatsächlicher E-Modul des Materials nach Angabe Hersteller
8	Trägheitsmoment absolut, geschätzt	I_y	18,430 cm⁴	25%	Trägheitsmoment I y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
8a	Vergleich: Vollplatte	$I_y = h^3b / 12$	74,150 cm⁴		Trägheitsmoment I y bezogen auf einen Referenz-Vollquerschnitt
<u>Leichtbaukennzahlen</u>					
9	Gewicht Platte	absolut	1010 g	12%	Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
9a	Vergleich: Vollplatte GFK		8160 g		Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 1,7 g/cm³
10	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	$b = B / G$	9,21	137%	Biegesteifigkeit pro Gewicht
10a	Vergleich: Vollplatte GFK		6,71		Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

Biegung GFK-PC

Messdaten

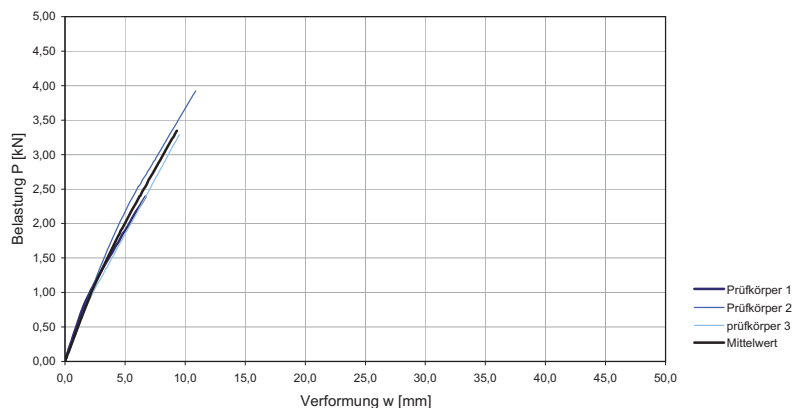
FB-1		FB-2		FB-3		FB Mittelwert	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Meßwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Meßwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Meßwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,021	0,020	0,059	0,060	0,139	0,080	0,040	0,040
0,030	0,030	0,130	0,110	0,475	0,200	0,080	0,070
0,035	0,030	0,220	0,160	0,902	0,310	0,128	0,095
0,155	0,080	0,354	0,230	1,385	0,430	0,255	0,155
0,287	0,120	0,498	0,290	1,982	0,550	0,392	0,205
0,489	0,180	0,672	0,350	2,720	0,660	0,580	0,265
0,724	0,240	0,865	0,420	3,595	0,770	0,794	0,330
0,955	0,300	1,069	0,480	4,519	0,890	1,012	0,390
1,193	0,360	1,307	0,550	5,445	1,010	1,250	0,455
1,462	0,420	1,550	0,610	6,385	1,120	1,506	0,515
1,753	0,490	1,810	0,670	7,314	1,230	1,782	0,580
2,102	0,540	2,095	0,730	8,257	1,350	2,098	0,635
2,459	0,600	2,423	0,790	9,167	1,460	2,441	0,695
2,885	0,660	2,786	0,860	10,076	1,570	2,836	0,760
3,344	0,720	3,167	0,910	10,976	1,680	3,255	0,815
3,797	0,790	3,619	0,980	11,904	1,790	3,708	0,885
4,274	0,850	4,062	1,040	12,816	1,900	4,168	0,945
4,729	0,910	4,530	1,100	13,711	2,010	4,629	1,005
5,203	0,970	4,997	1,160	14,618	2,110	5,100	1,065
5,673	1,030	5,458	1,220	15,551	2,220	5,565	1,125
6,128	1,090	5,922	1,280	16,453	2,320	6,025	1,185
6,609	1,150	6,398	1,340	17,374	2,430	6,503	1,245
7,086	1,210	6,859	1,400	18,300	2,530	6,972	1,305
7,544	1,270	7,334	1,460	19,231	2,630	7,439	1,365
7,994	1,320	7,791	1,510	20,158	2,730	7,893	1,415
8,464	1,380	8,261	1,570	21,092	2,840	8,362	1,475
8,920	1,440	8,708	1,630	22,012	2,940	8,814	1,535
9,362	1,500	9,144	1,680	22,940	3,030	9,253	1,590
9,827	1,560	9,612	1,740	23,876	3,140	9,719	1,650
10,273	1,610	10,079	1,800	24,802	3,230	10,176	1,705
10,731	1,670	10,549	1,860	25,710	3,330	10,640	1,765
11,186	1,730	10,991	1,910			11,088	1,820
11,644	1,780	11,433	1,960			11,538	1,870
12,092	1,840	11,889	2,020			11,990	1,930
12,542	1,900	12,351	2,080			12,446	1,990
13,002	1,950	12,801	2,130			12,902	2,040
13,473	2,010	13,256	2,190			13,365	2,100
13,921	2,070	13,706	2,240			13,813	2,155
14,373	2,120	14,155	2,290			14,264	2,205
14,831	2,180	14,615	2,350			14,723	2,265
15,297	2,230	15,074	2,400			15,185	2,315
15,754	2,290	15,530	2,460			15,642	2,375
16,220	2,340	15,985	2,510			16,102	2,425
16,670	2,400	16,420	2,560			16,545	2,480
17,127	2,450	16,886	2,610			17,006	2,530
17,572	2,500	17,344	2,660			17,458	2,580
18,039	2,550	17,805	2,720			17,922	2,635
18,506	2,610	18,270	2,770			18,388	2,690
18,976	2,660	18,731	2,820			18,853	2,740
19,425	2,710	19,182	2,870			19,303	2,790
19,905	2,760	19,635	2,930			19,770	2,845
20,353	2,820	20,094	2,980			20,223	2,900
20,814	2,870	20,559	3,020			20,686	2,945
21,270	2,920	21,023	3,070			21,146	2,995
21,752	2,970	21,491	3,130			21,621	3,050
22,209	3,020	21,941	3,180			22,075	3,100
22,677	3,070	22,401	3,230			22,539	3,150
23,139	3,130	22,868	3,280			23,003	3,205
23,602	3,180	23,325	3,330			23,463	3,255
24,063	3,230	23,779	3,380			23,921	3,305
24,521	3,280	24,229	3,430			24,375	3,355
24,979	3,330	24,703	3,480			24,841	3,405
25,443	3,380	25,153	3,530			25,298	3,455
25,909	3,430	25,611	3,570			25,760	3,500
26,368	3,480	26,072	3,620			26,220	3,550
26,832	3,530	26,526	3,670			26,679	3,600
27,306	3,580	26,978	3,720			27,142	3,650
27,749	3,630	27,432	3,760			27,591	3,695
28,202	3,680	27,873	3,810			28,037	3,745
28,643	3,730	28,309	3,850			28,476	3,790
29,093	3,770	28,768	3,900			28,930	3,835
29,557	3,820	29,214	3,940			29,385	3,880
30,016	3,870	29,671	3,990			29,843	3,930
30,466	3,920	30,115	4,030			30,291	3,975
30,933	3,970	30,580	4,070			30,756	4,020
31,377	4,020	31,022	4,120			31,199	4,070
31,811	4,070	31,442	4,150			31,626	4,110
32,257	4,110	31,889	4,190			32,073	4,150
32,712	4,160	32,318	4,220			32,515	4,190
33,146	4,200	32,760	4,260			32,953	4,230
33,586	4,250	33,194	4,300			33,390	4,275

	34,032	4,290	33,633	4,330			33,832	4,310
	34,470	4,330	34,052	4,370			34,261	4,350
	34,900	4,370	34,483	4,400			34,692	4,385
	35,332	4,410	34,917	4,440			35,124	4,425
	35,768	4,450	35,339	4,470			35,554	4,460
	36,200	4,490	35,769	4,510			35,984	4,500
	36,625	4,530	36,191	4,540			36,408	4,535
	37,066	4,570	36,634	4,580			36,850	4,575
	37,507	4,610	37,067	4,610			37,287	4,610
	37,962	4,650	37,490	4,640			37,726	4,645
	38,406	4,690	37,937	4,670			38,172	4,680
	38,857	4,730	38,368	4,700			38,612	4,715
	39,288	4,760	38,781	4,730			39,034	4,745
	39,713	4,800	39,211	4,760			39,462	4,780
	40,155	4,820	39,627	4,790			39,891	4,805
	40,595	4,850	40,061	4,820			40,328	4,835
	41,020	4,890	40,479	4,850			40,749	4,870
	41,463	4,930	40,903	4,870			41,183	4,900
	41,864	4,950	41,315	4,900			41,590	4,925
			41,720	4,920				
			42,086	4,940				
			42,451	4,960				
			42,794	4,980				
			43,135	5,000				

Biegung Glas-PC		Biegeversuch	
2x 2mm Floatglas + 3D-Wabenkern 36mm längs		800x150x40	1690 g Glas/PC
4-Punkt-Biegeversuch über 750 mm		5 mm/min	Kleber: Photowell DA 1015
		3 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte



Lastverformungsdiagramm
3D-Wabenplatte mit Glasdeckschichten 40mm




Biegung Glas-PC

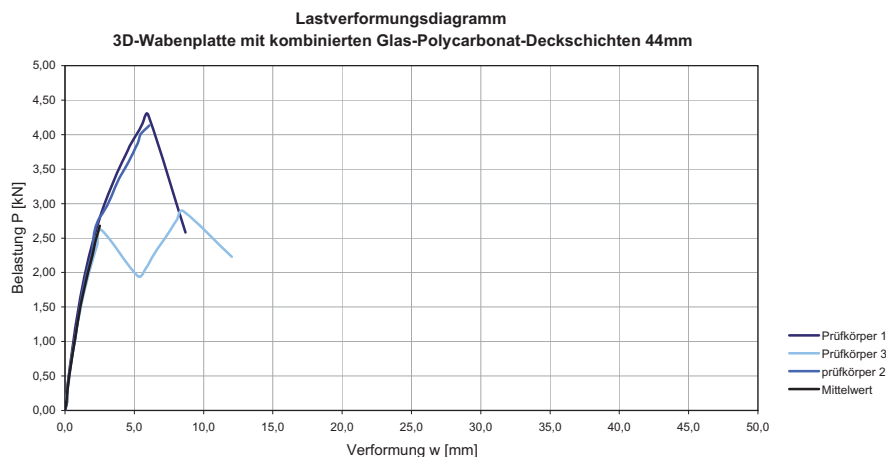
Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse			Referenz Vollplatte	(blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)
1	Steigungsgradient m	dP/dw	4,598 kN/cm	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Durchbiegungsfaktor k	$= 23/1296$		Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]
3	Gesamtsteifigkeit B	$= m \cdot k \cdot l^3$	34421,680 kNcm ²	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse, Schubverformung eingeschlossen
Vergleichskennwerte Steifigkeit				
4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	$B_s = B / b$	22948 Nm ² /m	breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=15 cm
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	$= E \cdot I_y$	101473 Nm ² /m	Berechnet mit I aus tatsächlichen Querschnitt und E des Werkstoffs
5a	Anteil Schubverformung	$\gamma = 1 - B_s / E \cdot I_y$	77%	Schubverformung des Kerns
5b	Schubmodul G	$= m \cdot l / \gamma \cdot 6db$	1,303 kN/cm ²	Berechnung nach [kle05]
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	$B_s = E_o \cdot t_o \cdot d^2 / 2$	101080 Nm ² /m	Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]
7	Äquivalentes E-Modul E _{Äq}	$E_{Äq} = B / I_y$	430 kN/cm ²	6% Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
7a	Vergleich: Vollplatte Glas	E	7000 kN/cm ²	Tatsächlicher E-Modul des Materials nach Angabe Hersteller
8	Trägheitsmoment absolut, geschätzt	I_y	24,280 cm ⁴	30% Trägheitsmoment I _y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt
8a	Vergleich: Vollplatte	$I_y = h^3 b / 12$	80,000 cm ⁴	Trägheitsmoment I _y bezogen auf einen Referenz-Vollquerschnitt
Leichtbaukennzahlen				
9	Gewicht Platte	absolut	1690 g	15% Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper
9a	Vergleich: Vollplatte Glas		11520 g	Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 1,2 g/cm ³
10	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	$b = B / G$	20,37	42% Biegesteifigkeit pro Gewicht
10a	Vergleich: Vollplatte Glas		48,61	Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

Biegung Glas-PC

Messdaten

GB-1		GB-2		GB-3		GB Mittelwert	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Meßwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Meßwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Meßwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,108	0,080	0,062	0,040	0,034	0,020	0,048	0,030
0,311	0,180	0,093	0,060	0,098	0,040	0,095	0,050
0,553	0,300	0,136	0,080	0,153	0,050	0,144	0,065
0,802	0,430	0,207	0,110	0,192	0,070	0,199	0,090
1,045	0,550	0,266	0,140	0,245	0,100	0,255	0,120
1,287	0,680	0,334	0,170	0,299	0,120	0,316	0,145
1,542	0,800	0,430	0,220	0,366	0,140	0,398	0,180
1,789	0,900	0,510	0,250	0,448	0,180	0,479	0,215
2,036	0,990	0,612	0,300	0,534	0,230	0,573	0,265
2,294	1,070	0,707	0,340	0,625	0,270	0,666	0,305
2,554	1,160	0,808	0,390	0,704	0,310	0,756	0,350
2,831	1,250	0,914	0,440	0,803	0,360	0,859	0,400
3,097	1,330	1,026	0,490	0,897	0,400	0,961	0,445
3,376	1,420	1,107	0,530	0,994	0,450	1,050	0,490
3,656	1,500	1,227	0,580	1,073	0,480	1,150	0,530
3,933	1,580	1,339	0,630	1,184	0,530	1,261	0,580
4,209	1,670	1,435	0,680	1,280	0,580	1,357	0,630
4,469	1,740	1,541	0,730	1,399	0,630	1,470	0,680
4,741	1,830	1,651	0,780	1,480	0,660	1,566	0,720
4,985	1,890	1,778	0,840	1,600	0,710	1,689	0,775
5,253	1,970	1,885	0,890	1,719	0,760	1,802	0,825
5,514	2,050	1,987	0,940	1,830	0,810	1,908	0,875
5,814	2,140	2,119	0,990	1,918	0,850	2,018	0,920
6,097	2,220	2,232	1,050	2,044	0,900	2,138	0,975
6,404	2,310	2,350	1,110	2,173	0,940	2,261	1,025
6,714	2,390	2,452	1,150	2,293	0,980	2,372	1,065
		2,582	1,210	2,402	1,020	2,492	1,115
		2,717	1,270	2,539	1,070	2,628	1,170
		2,841	1,320	2,666	1,110	2,753	1,215
		2,955	1,370	2,808	1,160	2,881	1,265
		3,079	1,430	2,911	1,180	2,995	1,305
		3,221	1,490	3,062	1,230	3,141	1,360
		3,351	1,540	3,207	1,280	3,279	1,410
		3,468	1,590	3,342	1,330	3,405	1,460
		3,613	1,650	3,474	1,360	3,543	1,505
		3,758	1,700	3,623	1,410	3,690	1,555
		3,889	1,760	3,775	1,460	3,832	1,610
		4,027	1,810	3,937	1,510	3,982	1,660
		4,152	1,860	4,045	1,540	4,098	1,700
		4,319	1,920	4,222	1,600	4,270	1,760
		4,457	1,980	4,376	1,650	4,416	1,815
		4,583	2,020	4,524	1,700	4,554	1,860
		4,730	2,080	4,660	1,740	4,695	1,910
		4,867	2,120	4,806	1,780	4,836	1,950
		5,003	2,170	4,976	1,840	4,990	2,005
		5,135	2,220	5,134	1,890	5,134	2,055
		5,275	2,270	5,259	1,930	5,267	2,100
		5,440	2,320	5,436	1,980	5,438	2,150
		5,576	2,370	5,594	2,030	5,585	2,200
		5,691	2,400	5,746	2,080	5,718	2,240
		5,827	2,440	5,872	2,120	5,849	2,280
		5,974	2,490	6,035	2,170	6,004	2,330
		6,129	2,540	6,212	2,230	6,170	2,385
		6,237	2,560	6,365	2,270	6,301	2,415
		6,384	2,610	6,506	2,320	6,445	2,465
		6,527	2,650	6,663	2,370	6,595	2,510
		6,676	2,690	6,832	2,420	6,754	2,555
		6,802	2,730	6,991	2,480	6,896	2,605
		6,940	2,770	7,135	2,520	7,037	2,645
		7,090	2,810	7,298	2,580	7,194	2,695
		7,235	2,850	7,461	2,630	7,348	2,740
		7,356	2,890	7,622	2,680	7,489	2,785
		7,490	2,920	7,754	2,720	7,622	2,820
		7,659	2,980	7,922	2,780	7,790	2,880
		7,810	3,020	8,104	2,840	7,957	2,930
		7,935	3,060	8,245	2,880	8,090	2,970
		8,083	3,100	8,404	2,940	8,244	3,020
		8,229	3,140	8,556	2,980	8,392	3,060
		8,379	3,190	8,726	3,040	8,552	3,115
		8,512	3,230	8,897	3,100	8,704	3,165
		8,649	3,270	9,039	3,140	8,844	3,205
		8,821	3,320	9,203	3,190	9,012	3,255
		8,954	3,360	9,369	3,240	9,162	3,300
		9,086	3,400	9,520	3,290	9,303	3,345
		9,241	3,440				
		9,392	3,490				
		9,549	3,540				
		9,700	3,580				
		9,822	3,610				
		9,980	3,660				
		10,136	3,710				
		10,270	3,750				
		10,432	3,790				
		10,603	3,840				
		10,737	3,880				
		10,886	3,920				

Biegung Glas/PC-PC	Biegeversuch			
2x 2mm Floatglas/2mm PC + 3D-Wabenkern 36mm längs	800x150x44	1690 g	Glas/PC	
4-Punkt-Biegeversuch über 750 mm	5 mm/min	Kleber: Photowell DA 1015		
21.08.2007	3 Prüfkörper	2 Aufnehmer in Feldmitte		



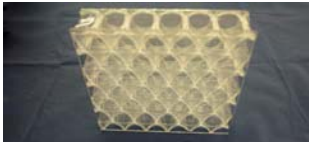
Biegung Glas/PC+PC

Direkte Kennwerte auf Grundlage Meßergebnisse			Referenz Vollplatte	(blau = Werte auf Grundlage Meßergebnisse)
1	Steigungsgradient m	dP/dw	10,661 kN/cm	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Durchbiegungsfaktor k	$= 23/1296$		Wert für 4-Punkt-Biegeversuch, nach [sta74]
3	Gesamtsteifigkeit B	$= m \cdot k \cdot l^3$	79821,968 kNcm ²	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse, Schubverformung eingeschlossen
Vergleichskennwerte Steifigkeit				
4	Gesamtsteifigkeit pro Einheitsbreite	$B_e = B / b$	53215 Nm ² /m	breitennormierte Steifigkeit auf 1m, b=15 cm
5	Biegesteifigkeit pro Einheitsbreite	$= B_e + B_{\text{SBBT}}$	126779 Nm ² /m	Berechnet mit I aus tatsächlichen Querschnitt und E der Werkstoffe
5a	Anteil Schubverformung	$\gamma = 1 - B_e / E \cdot I_y$	58%	Schubverformung des Kerns, der PC-Schicht und der Schubfuge
5b	Schubmodul G (Kern+PC-Schicht)	$= mI / \gamma \cdot 6db$	3,480 kN/cm ²	Berechnung nach [kle05]
6	Sandwich-Biegesteifigkeit	$B_s = E_s \cdot I_s \cdot d^2 / 2$	123480 Nm ² /m	Theoretische Biegesteifigkeit nach Sandwichtheorie [kle05]
7	Äquivalentes E-Modul $E_{\text{Äq}}$	$E_{\text{Äq}} = B / I_y$	750 kN/cm ²	Äquivalenter E-Modul, den ein Vollquerschnitt haben müsste
7a	---			
8	Trägheitsmoment absolut, geschätzt	I_y	50,760 cm ⁴	48%
8a	Vergleich: Vollplatte	$I_y = h^3 b / 12$	106,480 cm ⁴	Trägheitsmoment I _y bezogen auf den tatsächlichen Querschnitt Trägheitsmoment I _y bezogen auf einen Referenz-Vollquerschnitt
Leichtbaukennzahlen				
9	Gewicht Platte	absolut	2255 g	18%
9a	Vergleich: Vollplatte Glas		12672 g	Durchschnittsgewicht der drei Prüfkörper Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts mit 1,2 g/cm ³
10	Verhältnis Gesamtsteifigkeit zu Gewicht	$b = B / G$	35,40	60%
10a	Vergleich: Vollplatte Glas		58,82	Biegesteifigkeit pro Gewicht Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

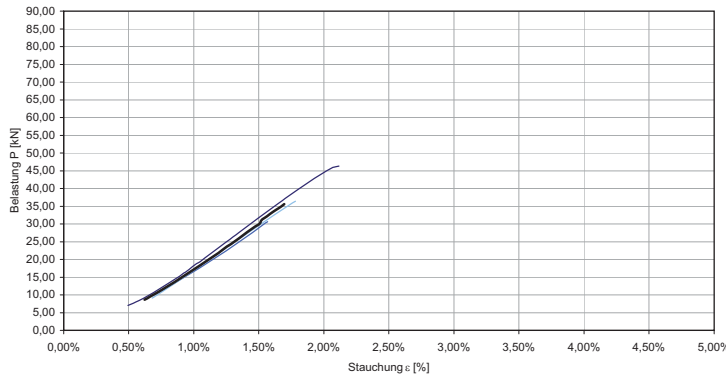
Biegung Glas/PC-PC

Messdaten

GB-1		GB-2		GB-3		GB Mittelwert	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Meßwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Meßwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Meßwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,144	0,120	0,134	0,120	0,036	0,110	0,085	0,115
0,167	0,330	0,186	0,330	0,127	0,210	0,156	0,270
0,313	0,580	0,353	0,580	0,290	0,470	0,322	0,525
0,473	0,830	0,562	0,830	0,468	0,710	0,515	0,770
0,658	1,100	0,773	1,100	0,646	0,970	0,710	1,035
0,857	1,350	0,955	1,350	0,867	1,230	0,911	1,290
1,078	1,600	1,151	1,600	1,108	1,470	1,129	1,535
1,309	1,850	1,412	1,850	1,386	1,720	1,399	1,785
1,554	2,080	1,687	2,080	1,689	1,960	1,688	2,020
1,831	2,310	1,982	2,310	2,005	2,190	1,993	2,250
2,124	2,540	2,083	2,540	2,334	2,400	2,209	2,470
2,448	2,750	2,367	2,750	2,681	2,610	2,524	2,680
2,789	2,960	3,030	2,960	5,225	1,950	4,127	2,455
3,149	3,150	3,432	3,150	5,831	2,060	4,632	2,605
3,537	3,340	3,860	3,340	6,263	2,210	5,061	2,775
3,938	3,520	4,356	3,520	6,709	2,360	5,533	2,940
4,337	3,690	4,798	3,690	7,228	2,500	6,013	3,095
4,748	3,860	5,212	3,860	7,663	2,630	6,437	3,245
5,174	4,010	5,320	3,920	8,098	2,770	6,709	3,345
5,587	4,150	5,467	4,010	8,527	2,890	6,997	3,450
5,999	4,290	6,100	4,134	12,033	2,230	9,067	3,182
8,706	2,580	8,920	3,210				

Druck GFK-PC		Druckversuch			
2 x 1,5mm GFK + 3D-Wabenkern 36mm längs		400x150x39	600 g		GFK / PC
Zentrischer Druckversuch		5 mm/min	Araldite 2026 (PU-2K)		
04.04.2007		3 Prüfkörper	2 Aufnehmer seitlich		

Lastverformungsdiagramm Druck / 3D-Wabenplatte mit GFK-Deckschichten 39mm



Belastung P [kN]

Stauchung ε [%]

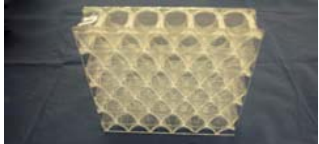
Prüfkörper 1
Prüfkörper 2
Prüfkörper 3
Mittelwert

Druck GFK-PC					
Ermittlung der Drucksteifigkeit				Referenz Vollplatte	
1	Drucksteifigkeit D	$D = dP/dε$	2715,279 kN	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)	
2	Querschnitt volle Fläche	A	58,5 cm²	Querkontraktion bleibt unberücksichtigt Außenabmessungen Querschnitt	
3	Äquivalenter Druckmodul	$E_{eq} = D / A$	46,415 kN/cm²	Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse	
4	Vergleich: Vollplatte GFK		720	Tatsächlicher E-Modul des Materials	
5	Maximallast	P_{max}	46,3 kN	Maximale Last vor dem Ausknicken / Versagen	
6	Breitennormierte Drucksteifigkeit	D_b	18102 kN/m	Wert aus 1 auf Referenzbreite von 1 Meter bezogen	
7	Drucksteifigkeit nach Sandwichtheorie	$D = 2 E_{eq} t_b b$	21600 kN/m	Nur die Deckschichten werden für den Lastabtrag angesetzt [kle05]	
Leichtbaukennzahlen					
8	Gewicht Prüfkörper	absolut	600 g	15%	Durchschnittsgewicht Prüfkörper
9	Vergleich: Vollplatte	1,7 g/cm³	3978 g		Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts
10	Verhältnis Drucksteifigkeit zu Gewicht	$δ = D / G$	4,53 kN/g	39%	Drucksteifigkeit pro Gewicht
11	Vergleich: Vollplatte PC	—	11,47		Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

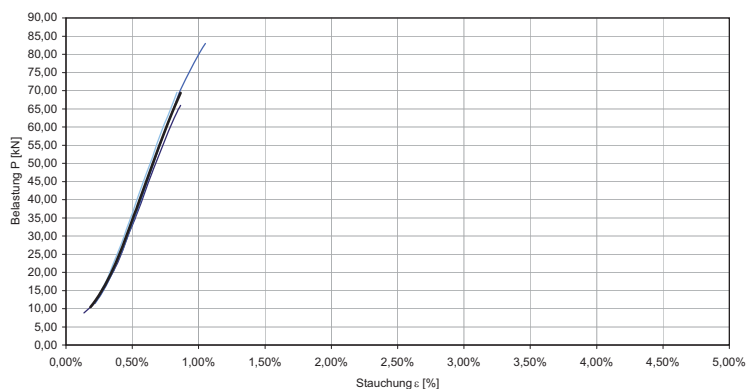
Druck GFK-PC

Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,494%	6,990	0,692%	9,990	0,681%	9,070	0,622%	8,683
0,535%	7,640	0,730%	10,730	0,721%	10,000	0,662%	9,457
0,578%	8,360	0,776%	11,710	0,760%	10,900	0,705%	10,323
0,624%	9,260	0,819%	12,630	0,806%	12,030	0,750%	11,307
0,662%	10,050	0,863%	13,560	0,846%	13,000	0,790%	12,203
0,699%	10,750	0,898%	14,250	0,890%	14,150	0,829%	13,050
0,746%	11,850	0,948%	15,420	0,928%	15,050	0,874%	14,107
0,789%	12,900	0,992%	16,420	0,969%	16,100	0,917%	15,140
0,826%	13,770	1,030%	17,280	1,016%	17,340	0,957%	16,130
0,869%	14,770	1,070%	18,180	1,056%	18,340	0,998%	17,097
0,910%	15,810	1,114%	19,180	1,099%	19,390	1,041%	18,127
0,960%	17,150	1,163%	20,360	1,143%	20,510	1,088%	19,340
0,998%	18,160	1,204%	21,350	1,184%	21,580	1,128%	20,363
1,036%	19,080	1,237%	22,060	1,227%	22,700	1,166%	21,280
1,087%	20,460	1,282%	23,230	1,264%	23,620	1,211%	22,437
1,130%	21,660	1,326%	24,360	1,305%	24,660	1,254%	23,560
1,175%	22,900	1,367%	25,410	1,350%	25,830	1,297%	24,713
1,213%	23,880	1,406%	26,440	1,396%	26,990	1,338%	25,770
1,252%	24,920	1,448%	27,500	1,433%	27,860	1,377%	26,760
1,301%	26,310	1,491%	28,670	1,480%	29,050	1,424%	28,010
1,347%	27,610	1,532%	29,780	1,525%	30,190	1,468%	29,193
1,387%	28,650	1,569%	30,670	1,569%	31,310	1,508%	30,210
1,435%	29,990			1,608%	32,230	1,521%	31,110
1,477%	31,110			1,649%	33,250	1,563%	32,180
1,523%	32,410			1,697%	34,450	1,610%	33,430
1,561%	33,360			1,740%	35,490	1,650%	34,425
1,608%	34,650			1,781%	36,440	1,695%	35,545
1,656%	35,960						
1,702%	37,250						
1,739%	38,090						
1,789%	39,430						
1,835%	40,610						
1,878%	41,650						
1,922%	42,690						
1,969%	43,770						
2,022%	44,990						
2,070%	45,910						
2,116%	46,270						

Druck Glas-PC	Druckversuch			
2x 2mm Floatglas + 3D-Wabenkern 36mm längs	400x150x20	825 g	Glas / PC	
Zentrischer Druckversuch	5 mm/min	Photowell DA 1015		
26.03.2007	3 Prüfkörper	2 Aufnehmer seitlich		

Lastverformungsdiagramm Glas-PC / Druck



Druck Glas-PC

Ermittlung der Drucksteifigkeit

Referenz Vollplatte

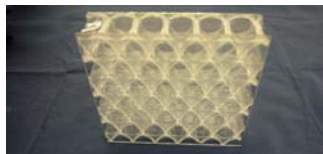
1	Drucksteifigkeit D	$D = dP/d\varepsilon$	10024,293 kN		Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)
2	Querschnitt volle Fläche	A	60 cm ²		Querkontraktion bleibt unberücksichtigt
3	Äquivalenter Druckmodul	$E_{\text{eq}} = D / A$	167,072 kN/cm ²		Berechnet auf Grundlage Meßergebnisse
4	Vergleich: Vollplatte Glas		7000		Tatsächlicher E-Modul des Materials
5	Maximallast	P_{max}	83,0 kN		Maximale Last vor dem Ausknicken / Versagen
6	Breitennormierte Drucksteifigkeit	D_b	66829 kN/m		Wert aus 1 auf Referenzbreite von 1 Meter bezogen
7	Drucksteifigkeit nach Sandwichtheorie	$D = 2 E_s t_o t_b$	280000 kN/m		Nur die Deckschichten werden für den Lastabtrag angesetzt [kle05]

Leichtbaukennzahlen

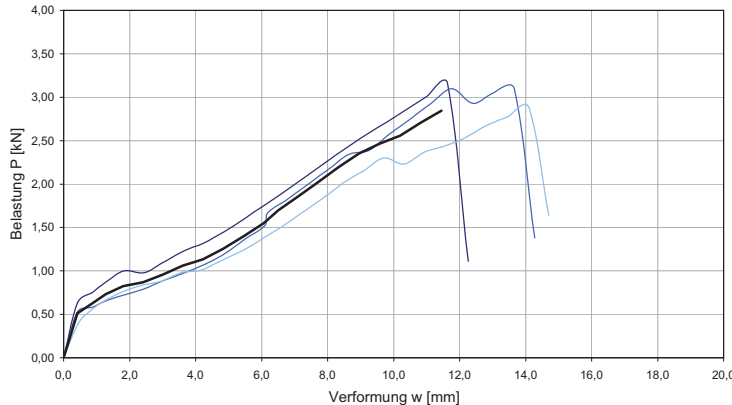
8	Gewicht Prüfkörper	absolut	825 g	14%	Durchschnittsgewicht Prüfkörper
9	Vergleich: Vollplatte Glas	2,4 g/cm ³	5760 g		Gewicht eines Referenz-Vollquerschnitts
10	Verhältnis Drucksteifigkeit zu Gewicht	$\delta = D / G$	12,15 kN/g	17%	Drucksteifigkeit pro Gewicht
11	Vergleich: Vollplatte Glas	—	72,92		Referenzwert einer Vollplatte mit gleichen Außenabmessungen

Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert	Messwert	Mittelwert	Messwert	Mittelwert	Messwert	Mittelwert	Mittelwert
Wegaufnehmer	Kraftaufnehmer	Wegaufnehmer	Kraftaufnehmer	Wegaufnehmer	Kraftaufnehmer	Wegaufnehmer	Kraftaufnehmer
mm	KN	mm	KN	mm	KN	mm	KN
0,136%	8,810	0,219%	11,470	0,202%	11,040	0,186%	10,440
0,177%	10,190	0,262%	13,730	0,236%	12,980	0,225%	12,300
0,213%	11,400	0,311%	16,930	0,269%	15,240	0,264%	14,523
0,260%	13,870	0,358%	20,500	0,299%	17,260	0,306%	17,210
0,298%	16,230	0,401%	24,010	0,333%	20,150	0,344%	20,130
0,342%	19,250	0,437%	26,980	0,372%	23,680	0,383%	23,303
0,378%	21,820	0,493%	32,500	0,401%	26,420	0,424%	26,913
0,416%	25,030	0,534%	36,630	0,439%	30,170	0,463%	30,610
0,452%	28,350	0,573%	40,700	0,477%	33,970	0,501%	34,340
0,499%	32,900	0,609%	44,410	0,519%	38,290	0,542%	38,533
0,535%	36,280	0,653%	49,160	0,555%	42,050	0,581%	42,497
0,580%	40,590	0,694%	53,610	0,593%	45,920	0,622%	46,707
0,619%	44,450	0,733%	57,670	0,634%	49,990	0,662%	50,703
0,659%	48,440	0,768%	60,970	0,672%	53,780	0,700%	54,397
0,697%	51,760	0,809%	64,970	0,711%	57,980	0,739%	58,237
0,743%	56,130	0,854%	69,430	0,749%	61,360	0,782%	62,307
0,788%	60,070	0,888%	72,110	0,792%	65,350	0,823%	65,843
0,829%	63,580	0,928%	74,910	0,838%	69,550	0,865%	69,347
0,865%	65,990	0,970%	77,910				
		1,010%	80,730				
		1,050%	82,970				

Abscheren GFK-PC		Abscherversuch			
2x 1,5mm GFK + 3D-Wabenkern 36mm längs		400x400x39	1440 g		GFK / PC
Abscherversuch mit azentrisch wirkende Kraft		5 mm/min	Zeit-Wege-Messung		
21.05.2007		2 Prüfkörper	1 Aufnahme in Krafrichtung		
Steigungsgradient m	dP/dw ~ Gxy	12,237	kN/cm	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)	

Lastverformungsdiagramm / 3D-Wabenplatte mit GFK-Deckschichten 39mm



Belastung P [kN]

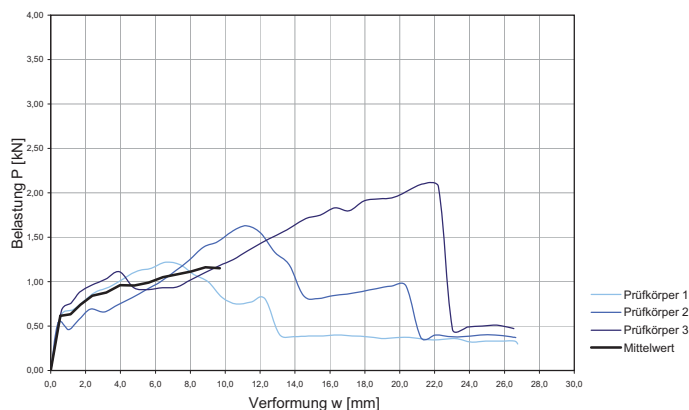
Verformung w [mm]

— Prüfkörper 1
— Prüfkörper 2
— Prüfkörper 3
— Mittelwert

Abscheren GFK-PC							
Messdaten							
Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,415	0,630	0,406	0,520	0,438	0,390	0,420	0,513
0,875	0,750	0,871	0,580	0,809	0,540	0,852	0,623
1,307	0,880	1,302	0,660	1,241	0,660	1,283	0,733
1,839	1,000	1,825	0,720	1,747	0,750	1,804	0,823
2,434	0,980	2,417	0,790	2,343	0,830	2,398	0,867
3,036	1,100	3,032	0,890	2,948	0,880	3,006	0,957
3,638	1,230	3,631	0,970	3,551	0,980	3,607	1,060
4,255	1,320	4,244	1,070	4,164	1,010	4,221	1,133
4,864	1,450	4,852	1,190	4,772	1,120	4,829	1,253
5,477	1,600	5,480	1,360	5,401	1,230	5,453	1,397
6,086	1,760	6,094	1,520	6,014	1,370	6,065	1,550
6,689	1,910	6,191	1,670	6,612	1,510	6,497	1,697
7,308	2,080	6,796	1,830	7,225	1,670	7,110	1,860
7,911	2,240	7,405	2,000	7,832	1,830	7,716	2,023
8,534	2,410	8,027	2,170	8,459	2,010	8,340	2,197
9,146	2,560	8,642	2,340	9,071	2,150	8,953	2,350
9,769	2,710	9,260	2,390	9,693	2,300	9,574	2,467
10,391	2,860	9,892	2,580	10,318	2,230	10,200	2,557
11,012	3,010	10,513	2,750	10,946	2,370	10,823	2,710
11,633	3,160	11,141	2,930	11,565	2,440	11,446	2,843
12,261	1,110	11,770	3,100	12,197	2,540		
		12,393	2,930	12,830	2,680		
		13,028	3,050	13,469	2,780		
		13,655	3,100	14,102	2,880		
		14,277	1,380	14,704	1,640		

Abscheren Glas-PC		Abscherversuch			
2x 2mm Glas + 3D-Wabenkern 36mm längs	400x400x40	2220 g	Glas / PC		
Abscherversuch mit azentrisch wirkende Kraft	5 mm/min	Zeit-Wege-Messung			
21.05.2007	2 Prüfkörper	1 Aufnahme in Kraftrichtung			
Steigungsgradient m	dP/du ~ Gxy	11,165 kN/cm	Linearer Regressionskoeffizient (über grau markierte Werte)		

Lastverformungsdiagramm / 3D-Wabenplatte mit Glasdeckschichten 40mm



Abscheren Glas-PC

Messdaten

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3		Mittelwerte	
Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Messwert Kraftaufnehmer KN	Mittelwert Wegaufnehmer mm	Mittelwert Kraftaufnehmer KN
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,614	0,630	0,425	0,540	0,618	0,680	0,552	0,617
1,237	0,680	1,020	0,460	1,177	0,760	1,145	0,633
1,835	0,770	1,596	0,570	1,656	0,880	1,696	0,740
2,543	0,880	2,271	0,690	2,343	0,960	2,386	0,843
3,344	0,940	3,053	0,660	3,142	1,030	3,180	0,877
4,145	1,030	3,857	0,740	3,936	1,110	3,979	0,960
4,953	1,120	4,663	0,820	4,768	0,930	4,795	0,957
5,766	1,150	5,484	0,910	5,582	0,910	5,611	0,990
6,596	1,220	6,301	1,000	6,411	0,930	6,436	1,050
7,409	1,190	7,132	1,120	7,219	0,940	7,253	1,083
8,214	1,080	7,938	1,240	8,028	1,020	8,060	1,113
9,012	1,000	8,751	1,390	8,843	1,100	8,869	1,163
9,831	0,820	9,560	1,450	9,649	1,180	9,680	1,150
10,643	0,750	10,371	1,560	10,462	1,250		
11,470	0,770	11,194	1,630	11,292	1,350		
12,278	0,810	12,020	1,550	12,108	1,440		
13,102	0,410	12,843	1,330	12,938	1,520		
13,938	0,380	13,668	1,190	13,769	1,610		
14,776	0,390	14,490	0,840	14,601	1,710		
15,603	0,390	15,316	0,810	15,436	1,750		
16,441	0,400	16,152	0,840	16,281	1,830		
17,280	0,390	16,987	0,860	17,112	1,800		
18,136	0,380	17,837	0,890	17,968	1,910		
18,965	0,360	18,670	0,920	18,808	1,930		
19,817	0,370	19,515	0,950	19,666	1,950		
20,674	0,370	20,367	0,950	20,510	2,030		
21,515	0,350	21,206	0,370	21,359	2,100		
22,372	0,350	22,055	0,400	22,220	2,070		
23,214	0,360	22,918	0,380	23,022	0,460		
24,068	0,320	23,759	0,380	23,871	0,490		
24,918	0,330	24,616	0,400	24,729	0,500		
25,763	0,330	25,465	0,400	25,576	0,510		
26,600	0,330	26,311	0,380	26,412	0,480		
26,757	0,300	26,650	0,370	26,547	0,470		

Zugscherversuch „WT 1001“, Polycarbonat, ungealtert

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 15.01.07

Prüfung ungealtert

Substrat: PC

Klebstoff: WT1001

Vorbehandlung: NN

Prüfparameter :

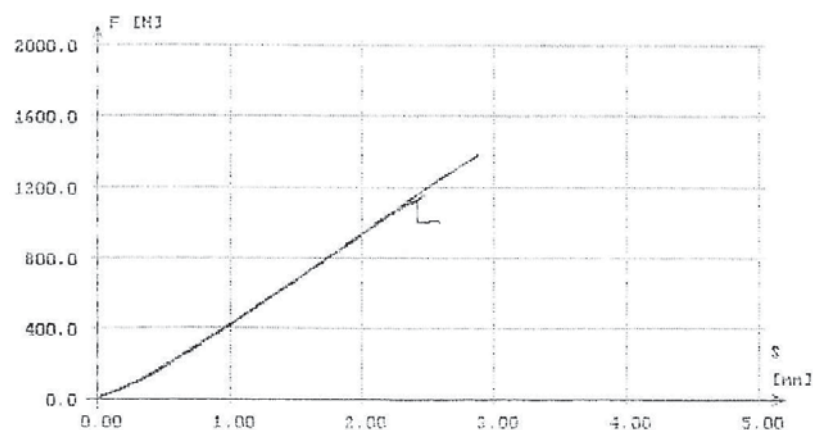
Probendicke	=	12,5	mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5	mm/min
Probenbreite	=	25	mm		=		
Vorkraft	=	10	N		=		
Bruchkriterium	=	500	N		=		

Resultate:

Nr.	AO	F _{max}	σ _{max}	S ₁ (F _{max})	ε ₁ (F _{max})	F _{brk}	σ _{brk}	W ₁ (F _{max})
	mm	N	N/mm ²	mm	%	N	N/mm ²	Jm
1	312,500	1129,0	3,6128	2,42	0,000	1003,8	3,2122	1,3026
2	312,500	1381,6	4,4211	2,88	0,000	1381,6	4,4211	1,8903
3	312,500	1158,0	3,7056	2,47	0,000	1152,4	3,6877	1,3494

Statistik aus 3 Meßwerten

	MW	VB95	S	V	Min	Max
AO[mm]	312,500	0,000	0,000	0,00	312,500	312,500
F _{max} [N]	1222,9	343,2	138,2	11,30	1129,0	1381,6
σ _{max} [N/mm ²]	3,9132	1,0981	0,4423	11,30	3,6128	4,4211
S ₁ (F _{max})[mm]	2,59	0,63	0,25	9,78	2,42	2,88
ε ₁ (F _{max})[%]	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000
F _{brk} [N]	1179,3	472,5	190,3	16,14	1003,8	1381,6
σ _{brk} [N/mm ²]	3,7737	1,5120	0,6090	16,14	3,2122	4,4211
W ₁ (F _{max})[Nm]	1,5141	0,8109	0,3266	21,57	1,3026	1,8903



Zugscherversuch „WT 1001“, GFK30%, ungealtert

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 15.01.07

Prüfung ungealtert
Substrat: GFK 30
Klebstoff: WT1001
Vorbehandlung: NN

Prüfparameter :

Probendicke	=	12.5	mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5	mm/min
Probenbreite	=	25	mm		=		
Vorkraft	=	10	N		=		
Bruchkriterium	=	500	N				

Resultate:

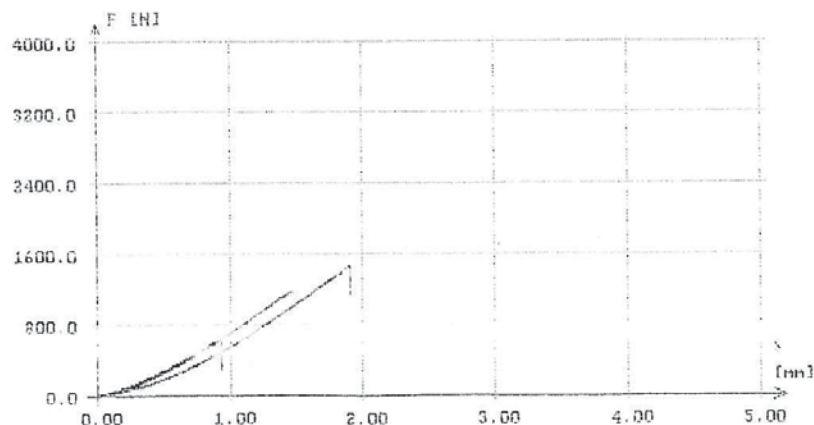
Nr	A0 mm ²	F-max N	σ -max N/mm ²	S-(Fmax) mm	ϵ -(Fmax) %	F-brk N	σ -brk N/mm ²	W-(Fmax) Nm
1	312.500	1457.400	4.664	1.904	0.000	1138.600	3.644	1.116
2	312.500	647.800	2.073	0.923	0.000	294.800	0.943	0.254
3	312.500	1175.600	3.762	1.466	0.000	1161.200	3.716	0.733

Statistik aus 3 Meßwerten

	MW	VB95	S	V	Min	Max
A0[mm ²]	312.500	0.000	0.000	0.00	312.500	312.500
F-max[N]	1093.600	1020.306	410.982	37.58	647.800	1457.400
σ -max[N/mm ²]	3.500	3.265	1.315	37.58	2.073	4.664
S-(Fmax)[mm]	1.431	1.219	0.491	34.32	0.923	1.904
ϵ -(Fmax)[%]	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000
F-brk[N]	864.867	1225.964	493.822	57.10	294.800	1161.200
σ -brk[N/mm ²]	2.768	3.923	1.580	57.10	0.943	3.716
W-(Fmax)[Nm]	0.701	1.072	0.432	61.64	0.254	1.116

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT



Zugscherversuch „WT 1001“, Floatglas

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 22.01.07

Prüfung ungealtert
Substrat: Floatglas
Klebstoff: WT 1001
Vorbehandlung: NN

Prüfparameter :

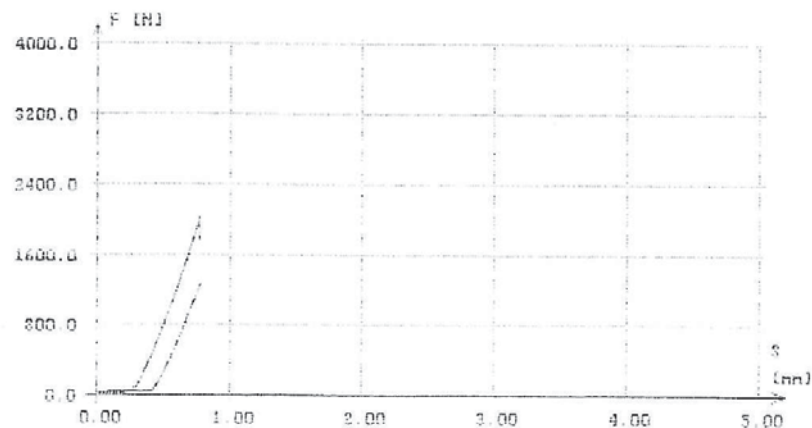
Probendicke	=	12,5	mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5	mm/min
Probenbreite	=	25	mm		=		
Vorkraft	=	10	N		=		
Bruchkriterium	=	500	N				

Resultate:

Nr.	A0 mm ²	F-max N	σ -max N/mm ²	S-(Fmax) mm	ε -(Fmax) %	F-brk N	σ -brk N/mm ²	W-(Fmax) Nm
1	312,500	1620,4	5,1853	0,57	0,000	1620,4	5,1853	0,3022
2	312,500	2016,0	6,4512	0,77	0,000	1779,4	5,6909	0,4675
3	312,500	1267,2	4,0550	0,78	0,000	1267,2	4,0550	0,2261

Statistik aus 3 Meßwerten

	MP	VB95	S	V	Min	Max
A0[mm ²]	312,500	0,090	0,000	0,00	312,500	312,500
F-max[N]	1534,5	930,0	374,6	22,92	1267,2	2016,0
σ -max[N/mm ²]	5,2305	2,9759	1,1987	22,92	4,0550	6,4512
S-(Fmax)[mm]	0,71	0,30	0,12	17,28	0,57	0,78
ε -(Fmax)[%]	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000
F-brk[N]	1555,0	149,3	261,7	16,83	1267,2	1779,4
σ -brk[N/mm ²]	4,9771	1,8722	0,8374	16,83	4,0550	5,6909
W-(Fmax)[Nm]	0,3519	0,3064	0,1234	37,19	0,2261	0,4675



Zugscherversuch „WT 1011“, Polycarbonat, ungealtert

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 17.12.06

Prüfung ungealtert
Substrat: Polycarbonat
Klebstoff: WT 1011
Vorbehandlung: ohne

Prüfparameter :

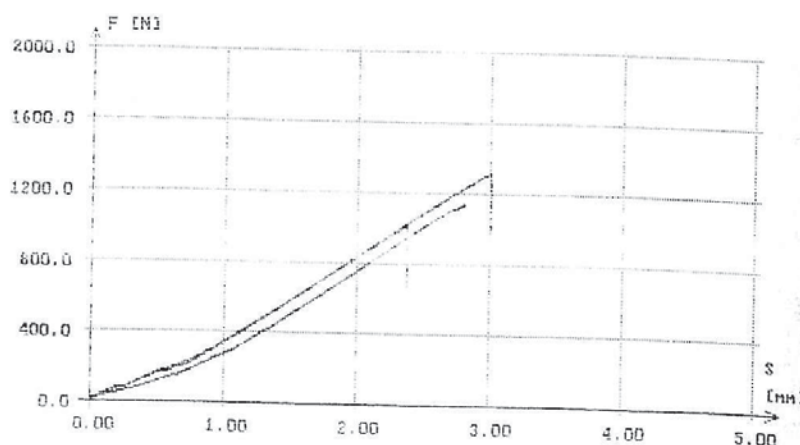
Probendicke	=	12,5 mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5 mm/min
Probenbreite	=	25 mm		=	
Vorkraft	=	10 N		=	
Bruchkriterium	=	500 N		=	

Resultate:

Nr.	A0 mm ²	F-max N	σ -max N/mm ²	S-(Fmax) mm	ϵ -(Fmax) %	F-brk N	σ -brk N/mm ²	W-(Fmax) Nm
1	312,500	1142,6	3,6563	2,81	0,000	1138,2	3,6422	1,4059
2	312,500	1007,6	3,2243	2,37	0,000	673,4	2,1546	1,0799
3	312,500	1313,2	4,2022	3,01	0,000	954,2	3,0534	1,8363

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT



Zugscherversuch „WT 1011“, Polycarbonat, ungealtert, Corona-Oberflächenbehandlung

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 17.12.06

Prüfung ungealtert
Substrat: Polycarbonat
Klebstoff: WT 1011
Vorbehandlung: Corona

Prüfparameter :

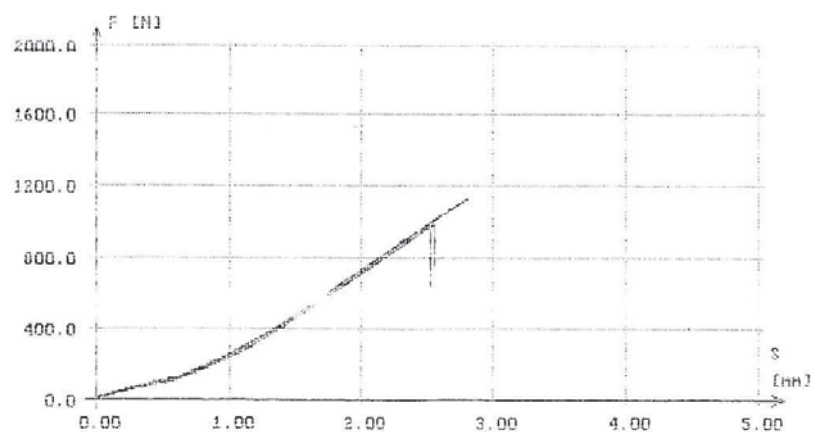
Probendicke	=	12,5	mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5	mm/min
Probenbreite	=	25	mm		=		
Vorkraft	=	10	N		=		
Bruchkriterium	=	500	N				

Resultate:

Nr	AG	F-max	e-max	S-(Fmax)	e-(Fmax)	F-brk	e-brk	F-(Fmax)
	mm ²	N	N/mm ²	mm	%	N	N/mm ²	Nm
1	312.500	379.4	3.1341	2.51	0.000	641.0	2.0512	1.0381
2	312.500	1125.0	3.6000	2.81	0.000	1125.0	3.6000	1.3418
3	312.500	980.8	3.1396	2.56	0.000	759.0	2.4288	1.0408

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT



Zugscherversuch „WT 1011“, Polycarbonat, gealtert

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
 Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 15.01.07

Prüfung gealtert
 Substrat: PC
 Klebstoff: WT1011
 Vorbehandlung: NN

Prüfparameter :

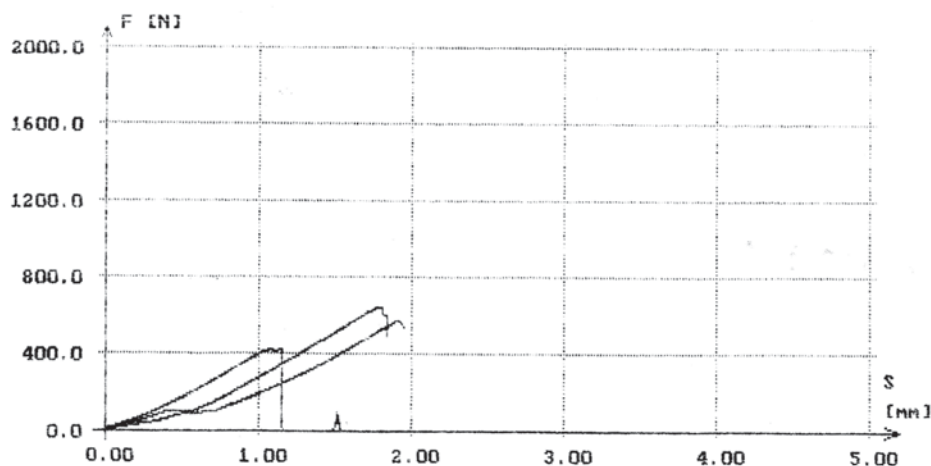
Probendicke	=	12.5	mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5	mm/min
Probenbreite	=	25	mm		=		
Vorkraft	=	10	N		=		
Bruchkriterium	=	500	N		=		

Resultate:

Nr	A0 mm ²	F-max N	σ -max N/mm ²	S-(Fmax) mm	ϵ -(Fmax) %	F-brk N	σ -brk N/mm ²	W-(Fmax) Nm
1	312.500	644.6	2.0627	1.78	0.000	485.6	1.5539	0.4723
2	312.500	574.2	1.8374	1.91	0.000	536.8	1.7178	0.4192
3	312.500	423.0	1.3536	1.15	0.000	0.0	0.0000	0.2413

Statistik aus 3 Meßwerten

	MW	VB95	S	V	Min	Max
A0[mm ²]	312.500	0.000	0.000	0.00	312.500	312.500
F-max[N]	547.3	281.1	113.2	20.69	423.0	644.6
σ -max[N/mm ²]	1.7513	0.8995	0.3623	20.69	1.3536	2.0627
S-(Fmax)[mm]
ϵ -(Fmax)[%]	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000
F-brk[N]	340.8	735.5	296.2	86.93	0.0	536.8
σ -brk[N/mm ²]	1.0906	2.3535	0.9480	86.93	0.0000	1.7178
W-(Fmax)[Nm]	0.3776	0.3004	0.1210	32.04	0.2413	0.4723



Zugscherversuch „WT 1011“, Polycarbonat, gealtert, Corona-Behandlung

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
 Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 15.01.07

Prüfung gealtert
 Substrat: PC
 Klebstoff: WT1011
 Vorbehandlung: Corona

Prüfparameter :

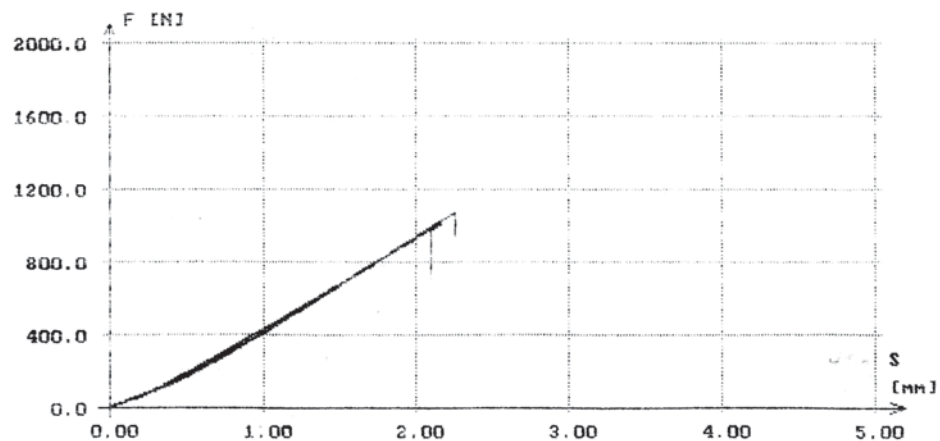
Probendicke	=	12.5	mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5	mm/min
Probenbreite	=	25	mm		=		
Vorkraft	=	10	N		=		
Bruchkriterium	=	500	N		=		

Resultate:

Nr	AO mm ²	F-max N	σ -max N/mm ²	S-(Fmax) mm	ϵ -(Fmax) %	F-brk N	σ -brk N/mm ²	W-(Fmax) Nm
1	312.500	1007.2	3.2230	2.17	0.000	1007.2	3.2230	1.0369
2	312.500	987.2	3.1590	2.10	0.000	706.0	2.2592	0.9575
3	312.500	1074.0	3.4368	2.26	0.000	943.4	3.0189	1.1169

Statistik aus 3 Meßwerten

	MW	VB95	S	V	Min	Max
AO [mm ²]	312.500	0.000	0.000	0.00	312.500	312.500
F-max [N]	1022.8	112.8	45.5	4.44	987.2	1074.0
σ -max [N/mm ²]	3.2730	0.3611	0.1455	4.44	3.1590	3.4368
S-(Fmax) [mm]	2.18	0.20	0.08	3.79	2.10	2.26
ϵ -(Fmax) [%]	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000
F-brk [N]	885.5	394.0	158.7	17.92	706.0	1007.2
σ -brk [N/mm ²]	2.8337	1.2609	0.5079	17.92	2.2592	3.2230
W-(Fmax) [Nm]	1.0371	0.1979	0.0797	7.68	0.9575	1.1169



Zugscherversuch „WT 1011“, Floatglas, ungealtert

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 17.12.06

Prüfung ungealtert
Substrat: Glas
Klebstoff: WT 1011
Vorbehandlung: ohne

Prüfparameter :

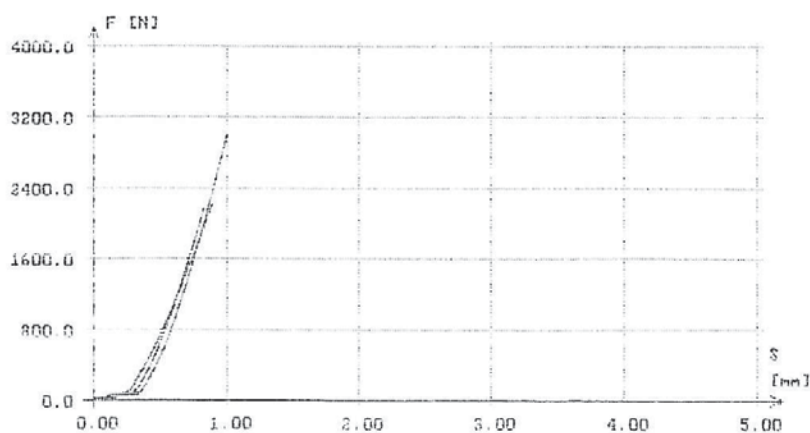
Probendicke	=	12.5	mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5	mm/min
Probenbreite	=	25	mm		=		
Vorkraft	=	10	N		=		
Bruchkriterium	=	500	N				

Resultate:

Nr	A0 mm ²	F-max N	σ -max N/mm ²	S-(Fmax) mm	c-(Fmax) %	F-brk N	σ -brk N/mm ²	W-(Fmax) Nm
1	312.500	2216.8	7.0938	0.89	0.000	2191.6	7.0131	0.6650
2	312.500	3022.2	9.6710	1.00	0.000	3022.2	9.6710	0.8830
3	312.500	2184.4	6.9901	0.83	0.000	2184.4	6.9901	0.5770

Statistik aus 3 Meßwerten

	MW	VB95	S	V	Min	Max
A0[mm ²]	312.500	0.000	0.000	0.00	312.500	312.500
F-max[N]	2474.5	1178.3	474.6	19.18	2184.4	3022.2
σ -max[N/mm ²]	7.9183	3.7706	1.5182	19.18	6.9901	9.6710
S-(Fmax)[mm]	0.91	0.22	0.09	9.77	0.83	1.00
c-(Fmax)[%]	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000
F-brk[N]	2466.1	1195.7	481.6	19.53	2184.4	3022.2
σ -brk[N/mm ²]	7.8914	3.8263	1.5412	19.53	6.9901	9.6710
W-(Fmax)[Nm]	0.6927	0.4420	0.1780	25.70	0.5302	0.8830



Zugscherversuch „WT 1011“, Floatglas, gealtert

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 15.01.07

Prüfung: Gealtert
Substrat: Floatglas
Material: WT 1011
Vorbehandlung:-

Prüfparameter :

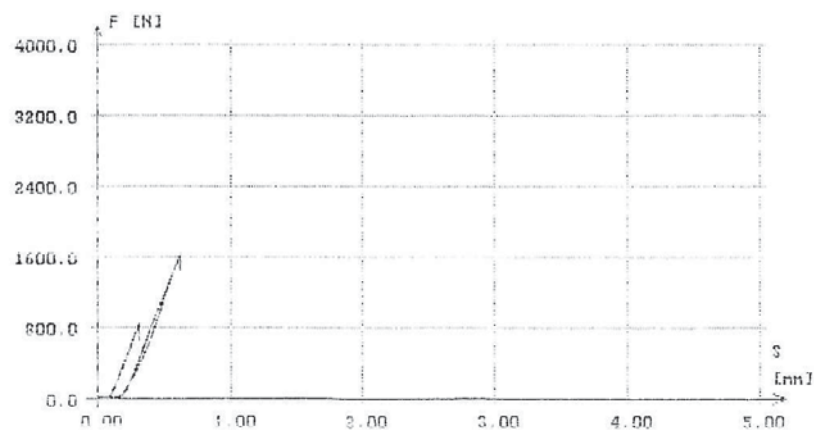
Probendicke	=	12,5 mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5 mm/min
Probenbreite	=	25 mm		=	
Vorkraft	=	10 N		=	
Bruchkriterium	=	500 N			

Resultate:

Nr	A0 mm ²	F-max N	σ -max N/mm ²	S-(Fmax) mm	ϵ -(Fmax) %	F-brk N	σ -brk N/mm ²	W-(Fmax) Nm
1	312.500	843.0	2.6976	0.31	0.000	660.4	2.1133	0.0885
2	312.500	1291.4	4.1325	0.54	0.000	1291.4	4.1325	0.2051
3	312.500	1632.6	5.2243	0.62	0.000	1430.4	4.5773	0.3514

Statistik aus 3 Meßwerten

	MW	VB95	S	V	Min	Max
A0[mm ²]	312.500	0.000	0.000	0.00	312.500	312.500
F-max[N]	1255.7	993.1	396.0	31.54	843.0	1632.6
σ -max[N/mm ²]	4.0181	3.1460	1.2672	31.54	2.6976	5.2243
S-(Fmax)[mm]	0.49	0.40	0.16	33.08	0.31	0.62
ϵ -(Fmax)[%]	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000
F-brk[N]	1127.4	1018.8	410.4	36.40	660.4	1430.4
σ -brk[N/mm ²]	3.6077	3.2601	1.3132	36.40	2.1133	4.5773
W-(Fmax)[Nm]	0.2150	0.3270	0.1317	61.27	0.0885	0.3514



Zugscherversuch „WT 1015“, Polycarbonat, ungealtert

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 15.01.07

Prüfung ungealtert
Substrat: PC
Klebstoff: WT1015
Vorbehandlung: NN

Prüfparameter :

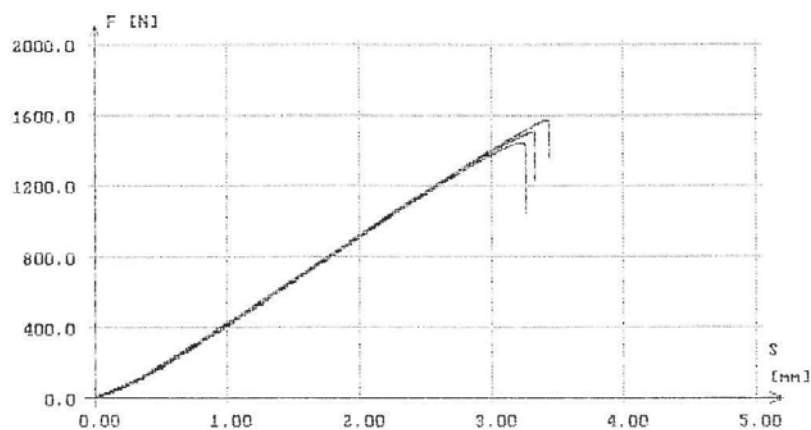
Probendicke	=	12,5	mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5	mm/min
Probenbreite	=	25	mm		=		
Vorkraft	=	10	N		=		
Bruchkriterium	=	500	N				

Resultate:

Nr.	A0 mm ²	F-max N	σ -max N/mm ²	S-(Fmax) mm	ϵ -(Fmax) %	F-brk N	σ -brk N/mm ²	W-(Fmax) Nm
1	312,500	1508,2	4,8262	3,33	0,000	1228,2	3,9302	2,4976
2	312,500	1442,4	4,6157	3,23	0,000	1038,0	3,3216	2,2962
3	312,500	1574,4	5,0381	3,42	0,000	1364,4	4,3661	2,6362

Statistik aus 3 Meßwerten

	WF	VB25	S	V	Min	Max
A0 [mm ²]	312,500	0,000	0,000	0,00	312,500	312,500
F-max [N]	1508,2	163,9	66,0	4,38	1442,4	1574,4
σ -max [N/mm ²]	4,8267	0,5243	0,2112	4,38	4,6157	5,0381
S-(Fmax) [mm]	3,32	0,25	0,10	2,97	3,23	3,42
ϵ -(Fmax) [%]	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000
F-brk [N]	1210,2	407,0	163,9	13,55	1038,0	1364,4
σ -brk [N/mm ²]	3,8726	1,3024	0,5246	13,55	3,3216	4,3661
W-(Fmax) [Nm]	2,4767	0,4244	0,1709	6,90	2,2962	2,6362



Zugscherversuch „WT 1015“, Floatglas, ungealtert

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 22.01.07

Prüfung ungealtert
Substrat: Floatglas
Klebstoff: WT 1015
Vorbehandlung: NN

Prüfparameter :

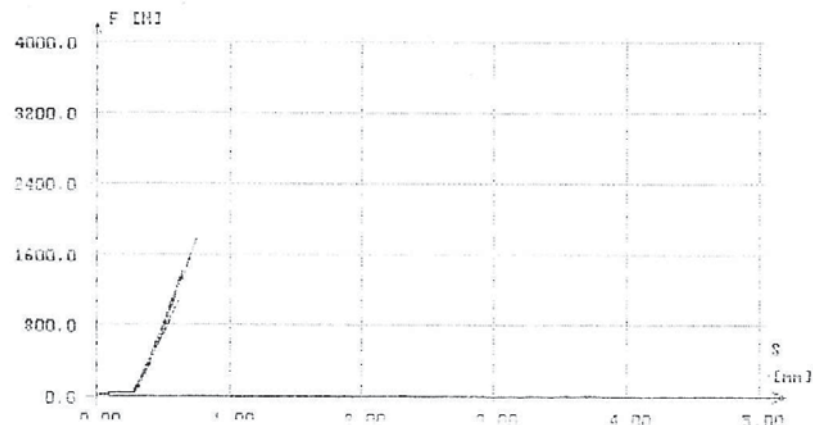
Probendicke	=	12,5	mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5	mm/min
Probenbreite	=	25	mm		=		
Vorkraft	=	10	N		=		
Bruchkriterium	=	500	N				

Resultate:

Nr	A0 mm ²	F-max N	σ -max N/mm ²	S-(Fmax) mm	ϵ -(Fmax) %	F-brk N	σ -brk N/mm ²	W-(Fmax) Nz
1	312,500	1756,0	5,6192	0,75	0,000	1756,0	5,6192	0,4126
2	312,500	1060,0	3,3920	0,61	0,000	1060,0	3,3920	0,1851
3	312,500	1365,0	4,3680	0,64	0,000	1365,0	4,3680	0,2260

Statistik aus 3 Meßwerten

	MW	VB05	S	V	Min	Max
A0[mm ²]	312,500	0,000	0,000	0,00	312,500	312,500
F-max[N]	1393,7	866,1	349,9	25,03	1060,0	1756,0
σ -max[N/mm ²]	4,4597	2,7717	1,1164	25,03	3,3920	5,6192
S-(Fmax)[mm]	0,67	0,17	0,07	10,33	0,61	0,75
ϵ -(Fmax)[%]	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000
F-brk[N]	1387,3	862,5	349,9	25,22	1060,0	1756,0
σ -brk[N/mm ²]	4,4395	2,7792	1,1195	25,22	3,3920	5,6192
W-(Fmax)[Nz]	0,2779	0,2965	0,1194	42,37	0,1851	0,4126



Zugscherversuch „Araldite 2026“, Polycarbonat, ungealtert

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 31.01.07

Versuch Nr.: 001
Substrat: PC
Klebstoff: Araldite 2026
Alterung: NN

Prüfparameter :

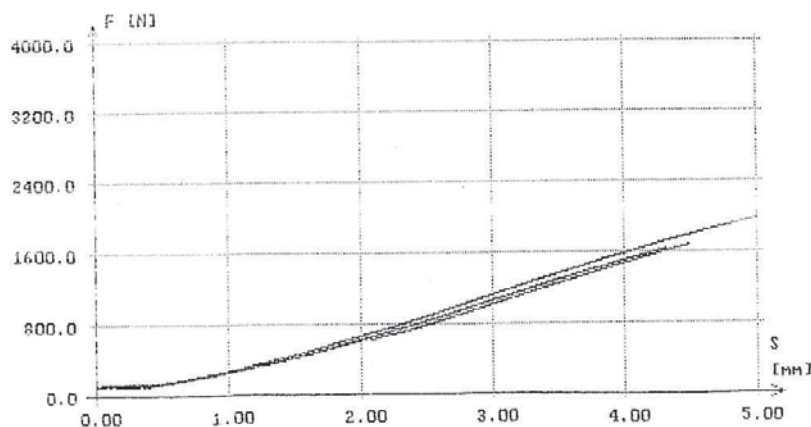
Probendicke	=	12.5 mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5 mm/min
Probenbreite	=	25 mm		=	
Vorkraft	=	100 N		=	
Bruchkriterium	=	500 N			

Resultate:

Nr	AO mm ²	F-max N	σ -max N/mm ²	S-(Fmax) mm	ϵ -(Fmax) %	F-brk N	σ -brk N/mm ²	W-(Fmax) Nm
1	312.500	1632.8	5.2250	4.32	15.16	1619.0	5.1808	3.2107
2	312.500	1672.8	5.3530	4.49	15.63	1672.8	5.3530	3.3794
3	312.500	2027.8	6.4890	5.13	18.06	2027.8	6.4890	4.9012

Statistik aus 3 Meßwerten

	MW	VB95	S	V	Min	Max
AO[mm ²]	312.500	0.000	0.000	0.00	312.500	312.500
F-max[N]	1777.8	539.8	217.4	12.23	1632.8	2027.8
σ -max[N/mm ²]	5.6890	1.7273	0.6958	12.23	5.2250	6.4890
S-(Fmax)[mm]	4.65	1.07	0.43	9.24	4.32	5.13
ϵ -(Fmax)[%]	16.29	3.86	1.55	9.54	15.16	18.06
F-brk[N]	1773.2	551.4	222.1	12.53	1619.0	2027.8
σ -brk[N/mm ²]	5.6742	1.7646	0.7108	12.53	5.1808	6.4890
W-(Fmax)[Nm]	3.8305	2.3116	0.9311	24.31	3.2107	4.9012



Zugscherversuch „Araldite 2026“, Floatglas, ungealtert

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 31.01.07

Versuch Nr.: 001
Substrat: Floatglas
Klebstoff: Araldite 2026
Alterung: NN

Prüfparameter :

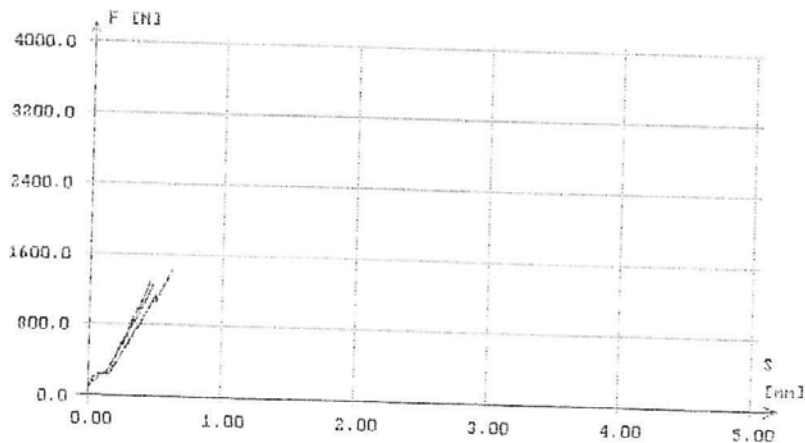
Probendicke	=	12,5 mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5 mm/min
Probenbreite	=	25 mm		=	
Vorkraft	=	100 N		=	
Bruchkriterium	=	500 N		=	

Resultate:

Nr	AO	F-max	σ -max	S-(Fmax)	ϵ -(Fmax)	F-brk	σ -brk	P-(Fmax)
	mm	N	N/mm ²	mm	%	N	N/mm ²	Nm
1	312,500	1445,2	4,6246	0,62	2,15	1440,8	4,6106	0,4122
2	312,500	1259,4	4,0301	0,48	1,68	1258,8	4,0282	0,2817
3	312,500	1271,0	4,0672	0,45	1,59	1271,0	4,0672	0,2623

Statistik aus 3 Meßwerten

	NW	VB95	S	V	Min	Max
AO[mm]	312,500	0,000	0,000	0,00	312,500	312,500
F-max[N]	1325,2	258,4	104,1	7,85	1259,4	1445,2
σ -max[N/mm ²]	4,2406	0,8269	0,3331	7,85	4,0301	4,6246
S-(Fmax)[mm]	0,52	0,22	0,09	17,43	0,45	0,62
ϵ -(Fmax)[%]	1,81	0,74	0,30	16,58	1,59	2,15
F-brk[N]	1323,5	252,6	101,7	7,69	1258,8	1440,8
σ -brk[N/mm ²]	4,2353	0,8082	0,3256	7,69	4,0282	4,6106
P-(Fmax)[Nm]	0,3187	0,2025	0,0816	25,59	0,2623	0,4122



Zugscherversuch „Araldite 2026“, GFK30%, ungealtert

UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
AG WERKSTOFF- U. OBERFLÄCHENTECHNIK
Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann

PRÜFBERICHT

Prüfprotokoll vom 22.01.07

Prüfung ungealtert
Substrat: GFK 30
Klebstoff: Araldite 2026
Vorbehandlung: NN

Prüfparameter :

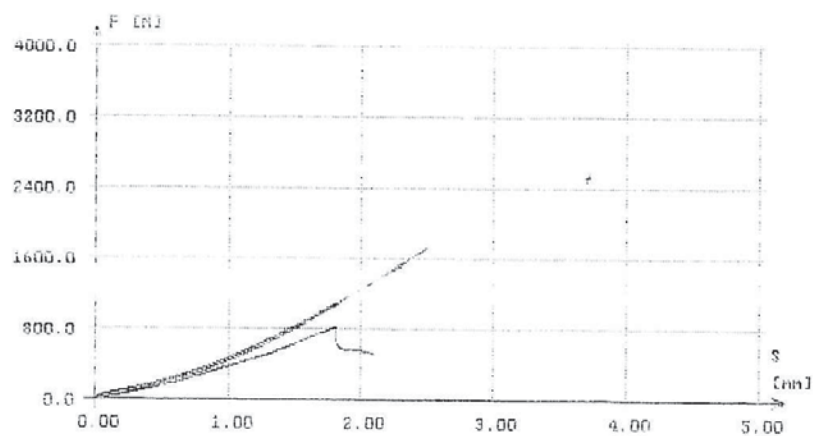
Probendicke	=	12,5	mm	Prüfgeschwindigkeit	=	5	mm/min
Probenbreite	=	25	mm		=		
Vorkraft	=	10	N		=		
Bruchkriterium	=	500	N		=		

Resultate:

Nr	A0 mm ²	F-max N	σ -max N/mm ²	S-(Fmax) mm	ϵ -(Fmax) %	F-brk N	σ -brk N/mm ²	W-(Fmax) Nm
1	312.500	1519,2	4.8614	2.32	0.000	1519,2	4.8614	1.5019
2	312.500	822,6	2.6323	1.81	0.000	503,0	1.6096	0.6352
3	312.500	1737,4	5.5597	2.51	0.000	1737,4	5.5597	1.7661

Statistik aus 3 Meßwerten

	MM	VD95	S	V	Min	Max
A0[mm ²]	312.500	0.000	0.000	0.00	312.500	312.500
F-max[N]	1359,7	1196,2	477,8	35,14	822,6	1737,4
σ -max[N/mm ²]	4.3511	3.7958	1.5289	35,14	2.6323	5.5597
S-(Fmax)[mm]	2,21	0,90	0,36	16,42	1,81	2,51
ϵ -(Fmax)[%]	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000
F-brk[N]	1259,2	1635,5	659,8	52,57	503,0	1737,4
σ -brk[N/mm ²]	4.0102	5.2336	2.1081	52,57	1.6096	5.5597
W-(Fmax)[Nm]	1.3011	1.4627	0.5916	45,47	0.6352	1.7661



Glossar verwendeter Kenngrößen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
---------	---------	--------------

Materialspezifische Kenngrößen

U	$\text{W/m}^2\text{K}$	Wärmedurchgangskoeffizient
λ	W/mK	Wärmeleitzahl
α_T	K^{-1}	Wärmedehnzahl
τ_{D65}	%	Transmissionsgrad Sichtbars Licht / UV-Strahlung

Geometrische Kenngrößen

b	mm	Breite Sandwichelement
h	mm	Gesamtstärke/Bauhöhe Sandwichverbund
d	mm	Statische Höhe Sandwichverbund = Achsabstand der Deckschichten
s	mm	Durchschnittliche Zellgröße Kernschicht (Stegabstand / Wabenabstand)
t_D	mm	Schichtdicke Deckschicht
t_K	mm	Schichtdicke Kernschicht
A	cm^2	Brutto-Querschnittsfläche eines Sandwichelements (Breite b x Gesamtstärke h)

Statisch-konstruktive Kenngrößen

l	mm	Spannweite (Biegung), Knicklänge (Druck)
$L_{i,x}$	mm	Ideelle Spannweite in X-Richtung, abhängig von den Lagerungsbedingungen
$L_{ii,y}$	mm	Ideelle Spannweite in Y-Richtung, abhängig von den Lagerungsbedingungen
w	mm	Verformungsweg der Stauchung (Druck)
w_{ges}	mm	Gesamtverformungsweg bei Biegung
w_b	mm	Verformungsweg der Biegeverformung (Biegung)
w_s	mm	Verformungsweg der Schubverformung (Biegung)
k		Dimensionsloser Systemfaktor zur Bestimmung der Verformung bei Biegung, je nach statischem System
I_y	cm^4	Flächenträgheitsmoment 2.Grades
P	kN	Einwirkende Einzellast
M	kNm	Moment aus Biegung
Q	kN	Querkraft
N_D, N_z	kN	Kräftepaar, resultierend aus einem Biegemoment

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$\sigma_{D,Z}$	kN/cm ²	Zugfestigkeit / Zugspannung Deckschicht
$\sigma_{D,D}$	kN/cm ²	Druckfestigkeit / Druckspannung Deckschicht
σ_{Beul}	kN/cm ²	Grenzspannung beulgefährdeter Deckschichten
τ_D	kN/cm ²	Schubfestigkeit / Schubspannung Deckschicht
τ_{Fuge}	kN/cm ²	Schubfestigkeit / Schubspannung Schichtfuge
$\tau_{K,z}$	kN/cm ²	Schubfestigkeit / Schubspannung Kernschicht quer zur Plattenebene
$\tau_{K,x(y)}$	kN/cm ²	Schubfestigkeit / Schubspannung Kernschicht parallel zur Plattenebene
E_D	kN/cm ²	Materialsteifigkeit / Elastizitätsmodul Deckschicht
$E_{K,z}$	kN/cm ²	Materialsteifigkeit / Elastizitätsmodul Kernschicht quer zur Plattenebene
$E_{K,x(y)}$	kN/cm ²	Materialsteifigkeit / Elastizitätsmodul Kernschicht parallel zur Plattenebene
G_D	kN/cm ²	Schubmodul Deckschicht
$G_{K,x(y)}$	kN/cm ²	Schubmodul Kernschicht, parallel zur Plattenebene
B	kNcm ²	Gesamtbiegesteifigkeit eines Sandwichelements
B_o	Nm ² /m	Breitennormierte Gesamtbiegesteifigkeit, bezogen auf eine Querschnittsbreite von 1 Meter
D	kNcm ² /cm ²	Druck-/Dehnsteifigkeit gemäß Hook'sches Gesetz
ϵ	%	Elastische Stauchung/Dehnung gemäß Hook'sches Gesetz, bezogen auf die Ursprungslänge
$S_{x,y}$	kNcm ² /cm ²	Schubsteifigkeit, parallel zur Plattenebene
m	kN/cm	Steigungsgradient, ermittelt aus Meßdaten, nach Gl. (13)
β		Verhältniswert Gesamtbiegesteifigkeit zu Absolutgewicht Sandwichelement, nach Gl. (18)
δ		Verhältniswert Drucksteifigkeit zu Absolutgewicht Sandwichelement, nach Gl. (23)
γ		Schubverformungsanteil bei Biegebeanspruchung, nach Gl. (19)

Weitere Kenngrößen zu Kapitel 4

d	mm	Wabendurchmesser
a	mm	Achsmaß des triangulierten Lochrasters
s	mm	Versatzmaß von ober- und unterseitigem Lochraster
\ddot{u}	mm	Überlappungsmaß der Waben
t_{KF}	mm	Kernschichtdicke im Bereich der Kontaktfläche
t_{KM}	mm	Kernschichtdicke in der Mittelebene

Zeichen	Einheit	Beschreibung
α	$^{\circ}$	Verjüngungswinkel Wabenwandung zu Kontaktfläche
$R_{o,u}$	mm	Wabenradius, ober- und unterseitig
A	cm^2	Kontaktfläche
A_{Δ}	cm^2	Bezugsfläche (gleichseitiges Dreieck)
$S_{\text{Klebefuge}}$	cm^3	Statisches Moment im Bereich der Klebefuge
σ_B	kN/cm^2	Biege(-zug)festigkeit
σ_D	kN/cm^2	Druckfestigkeit
σ_Z	kN/cm^2	Zugfestigkeit

Lebenslauf

Florian Mähl
Geboren 1976 in Fürstenfeldbruck

Ausbildung

1996 - 2002 Studium der Architektur an der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Diplom mit Auszeichnung

Beruflicher Werdegang

1998 - 2001 Studienbegleitende Mitarbeit in Architekturbüros in Hamburg, Köln und Aachen

1998 - 2002 Wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl Baukonstruktion I, RWTH Aachen

2001 - 2002 Mitarbeiter bei form TL, Radolfzell am Bodensee

2002 - 2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Tragwerksentwurf
und Konstruktionen (Fachbereich Architektur, Bauingenieurwesen,
Raum- und Umweltplanung) an der Technischen Universität
Kaiserslautern bei Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft

2002 - 2007 Freier Mitarbeiter im Büro osd - office for structural design,
Darmstadt / Frankfurt am Main

seit 2007 Projektleiter im Büro osd - office for structural design, Frankfurt am Main
Schwerpunkte Fassadenplanung, Konstruktiver Glas- und Kunststoffbau